

## **Vliv geometrie řezného nástroje ze slinutého karbidu na čelní soustružení hliníkových slitin**

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: Artur Knap

Vedoucí práce: doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.



## **Influence of sintered carbide cutting tool geometry on the frontal turning of aluminium alloys**

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering

Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering

Author: Artur Knap

Supervisor: doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Artur Knap**  
Osobní číslo: **S17000394**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Vliv geometrie řezného nástroje ze slinutého karbidu na čelní soustružení hliníkových slitin**  
Zadávací katedra: **Katedra obrábění a montáže**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Shrnutí dosavadních poznatků o obrábění hliníkových slitin. Shrnutí poznatků o technologii soustružení a vlivu geometrie řezného nástroje na samotný proces obrábění.
2. Rozbor experimentálních metod pro stanovení vlivu geometrie řezného nástroje ze slinutého karbidu na čelní soustružení hliníkových slitin.
3. Návrh metodiky experimentů v rámci zkoumání vlivu geometrie řezného nástroje ze slinutého karbidu na čelní soustružení hliníkových slitin.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení kvality obrobených povrchů hliníkových slitin v rámci vlivu geometrie řezného nástroje na čelní soustružení.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací: Obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby.

Rozsah pracovní zprávy: Cca 40 - 50 stran textu.

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. KOCMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. VIGNER, M., PŘIKRYL, Z. a kol. *Obrábění*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1984. 808 s. ISBN -.
4. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
5. SEDLÁČEK, V. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: SNTL, 1979. 398 s. ISBN -.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Katedra obrábění a montáže

Konzultant bakalářské práce: Ing. Miloslav Ledvina

Katedra obrábění a montáže

Datum zadání bakalářské práce: 20. listopadu 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 20. května 2019

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Jan Jersák, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 20. listopadu 2017

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 3. 1. 2019

Podpis:

## **Anotace**

Obsahem bakalářské práce je výzkum vlivu geometrie řezného nástroje na čelní soustružení hliníkové slitiny.

Teoretická část obsahuje nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky. Do této části práce jsou zahrnuty informace o technologii soustružení, slinutých karbidech a hliníkových slitinách.

Experimentální část obsahuje informace o použitých strojích, zařízeních a metodice pro jednotlivé experimenty. V závěru práce jsou popsány naměřené hodnoty a zhodnocení experimentu.

Klíčová slova: soustružení, slinuté karbidy, hliníkové slitiny.

## **Annotation**

The bachelor thesis deals with a research of cutting tool geometry influence on facing turning of the aluminium alloy.

All necessary basic terms concerning researched topic are mentioned in the theoretical part of the thesis. This theoretical chapter includes knowledge of turning technology, sintered carbides and aluminium alloys.

The experimental part contains information about used machines, devices and methodology for individual experiments. There are reports on measured values and processed results at the end of the thesis.

Key words: turning, sintered carbides, aluminium alloys.

## Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: KOM 1300

Jméno a příjmení: Artur Knap

Vedoucí práce: doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D

Konzultant: Ing. Miloslav Iedvina, Ph.D

Počet stran: 72

Počet příloh: 1

Počet tabulek: 27

Počet obrázků: 39

Počet grafů: 27

## Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1. Soustružení .....</b>	<b>13</b>
2.1.1. Podélné a čelní soustružení .....	13
2.1.2. Geometrie řezného nástroje .....	14
2.1.3. Vliv geometrie .....	17
2.1.4. Řezná síla .....	17
2.1.5. Řezné podmínky .....	18
<b>2.2. Slinuté karbidy .....</b>	<b>19</b>
2.2.1. Nepovlakované SK .....	19
2.2.2. Povlakované SK .....	20
2.2.3. Současný stav .....	21
<b>2.3. Hliník a jeho slitiny .....</b>	<b>22</b>
2.3.1. Procesní média .....	23
<b>3. METODIKA MĚŘENÍ A HODNOCENÍ EXPERIMENTU .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Zkušební vzorky .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2. Popis strojů, nástrojů, měřících zařízení a pomůcek .....</b>	<b>26</b>
3.2.1. Pásová pila .....	26
3.2.2. Soustruh .....	27
3.2.3. Soustružnický nůž .....	28
3.2.4. Nástrojová bruska .....	28
3.2.5. Dynamometr Kistler .....	29
3.2.6. Laboratorní profiloměr Mitutoyo .....	30
3.2.7. Ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC .....	30
3.2.8. Aparatura pro dávkování procesní kapaliny .....	31
3.2.9. Aparatura MQL .....	31
3.2.10. Procesní kapalina Zubura Universal .....	32
3.2.11. Mazivo Accu-Lube LB-2000 .....	32
3.2.12. Papírová úhlová příložka .....	33
<b>3.3. Řezné podmínky experimentu .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4. Metodika experimentů .....</b>	<b>34</b>
3.4.1. Příprava vzorků .....	34
3.4.2. Příprava nástrojů .....	34
3.4.3. Příprava PM .....	34
3.4.4. Proces soustružení .....	34
3.4.5. Sledování nárůstu .....	35
3.4.6. Řezné síly .....	35
3.4.7. Drsnost povrchu vzorků .....	36
<b>3.5. Vyhodnocení výsledků měření řezných sil .....</b>	<b>37</b>



3.5.1.	Řezné síly – ideální podmínky .....	37
3.5.2.	Řezné síly – $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	38
3.5.3.	Řezné síly – $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	39
3.5.4.	Řezné síly – $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ .....	40
3.5.5.	Řezné síly – $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ .....	41
3.5.6.	Řezné síly – $a_{p1} = 1 \text{ mm}$ .....	42
3.5.7.	Řezné síly – $a_{p2} = 4 \text{ mm}$ .....	43
3.5.8.	Řezné síly – $\gamma_{o1} = -10^\circ$ .....	44
3.5.9.	Řezné síly – $\gamma_{o2} = 0^\circ$ .....	45
3.5.10.	Řezné síly – MQL .....	46
3.5.11.	Řezné síly – PK .....	47
3.5.12.	Souhrn výsledků měření řezných sil .....	48
<b>3.6.</b>	<b>Vyhodnocení výsledků měření drsností .....</b>	<b>50</b>
3.6.1.	Drsnost povrchu – ideální podmínky .....	50
3.6.2.	Drsnost povrchu – $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	51
3.6.3.	Drsnost povrchu – $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	52
3.6.4.	Drsnost povrchu – $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ .....	53
3.6.5.	Drsnost povrchu – $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ .....	54
3.6.6.	Drsnost povrchu – $a_{p1} = 1 \text{ mm}$ .....	55
3.6.7.	Drsnost povrchu – $a_{p2} = 4 \text{ mm}$ .....	56
3.6.8.	Drsnost povrchu – $\gamma_{o1} = -10^\circ$ .....	57
3.6.9.	Drsnost povrchu – $\gamma_{o2} = 0^\circ$ .....	58
3.6.10.	Drsnost povrchu – MQL .....	59
3.6.11.	Drsnost povrchu – PK .....	60
3.6.12.	Souhrn výsledků měření drsnosti .....	61
<b>4.</b>	<b>DISKUZE .....</b>	<b>63</b>
<b>5.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>68</b>
<b>6.</b>	<b>ZDROJE .....</b>	<b>70</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

ZKRATKA/SYMBOL	JEDNOTKY	NÁZEV
$\text{Al}_2\text{O}_3$	[-]	oxid hlinitý (Korund)
$a_p$	[mm]	hloubka záběru
$C_F$	[-]	konstanta
CVD	[-]	Chemical Vapor Deposition
DLC	[-]	Diamond-like Carbon
$f$	[mm·ot <sup>-1</sup> ]	posuv
$F_c$	[N]	řezná síla
$F_f$	[N]	posuvová síla
$F_p$	[N]	přísuvová síla
$\text{MoS}_2$	[-]	disulfid molybdenu
MQL	[-]	Minimal Quantities of Lubricant
$n$	[ot·min <sup>-1</sup> ]	otáčky
PK	[-]	procesní kapalina
PM	[-]	procesní médium
PVD	[-]	Physical Vapor Deposition
$R_a$	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
$R_t$	[μm]	celková výška profilu
$R_z$	[μm]	největší výška profilu

RO	[-]	rychlořezná ocel
SK	[-]	slinutý karbid
TaC	[-]	karbid tantalu
TiB <sub>2</sub>	[-]	diborid titanu
TiC	[-]	karbid titanu
TiCN	[-]	karbonitrid titanu
TiN	[-]	nitrid titanu
$V_c$	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost
$V_{cn\_40/130/220}$	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost – otáčky $n$ , průměr 40/130/220 mm
$V_{cn1\_40/130/220}$	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost – otáčky $n_1$ , průměr 40/130/220 mm
$V_{cn2\_40/130/220}$	$[m \cdot s^{-1}]$	řezná rychlost – otáčky $n_2$ , průměr 40/130/220 mm
$V_e$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost výsledného řezného pohybu
$V_f$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost posuvu
$V_p$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost přísuvu
WC	[-]	karbid wolframu
$x_F$	[-]	exponent
$y_F$	[-]	exponent

## 1. ÚVOD

Bakalářská práce byla zpracována pro firmu Ronal ČR s.r.o. spadající pod společnost RONAL GROUP, která je jedním z celosvětově nejvýznamnějších výrobců a dodavatelů kol z lehkých slitin pro osobní automobily a užitkové vozy.

Firma Ronal ČR s.r.o. řeší problém se vznikem vizuální změny povrchu kol vzniklé při obrábění. Tato změna je patrná při čelním soustružení za konstantních řezných podmínek a za použití negativní geometrie nástroje. Uvedená problematika byla zadána k řešení Technické univerzitě v Liberci a její výzkum je uveden v předložené bakalářské práci.

Bakalářská práce je rozdělena do tří základních částí: teoretické, experimentální a závěrečné. Práce je zaměřena na zkoumání vlivu geometrie řezného nástroje při zvolené metodě obrábění.

Teoretická část předkládané práce souvisí se současným stavem řešené problematiky, obsahuje základní informace vztahující se k čelnímu soustružení, nástrojovým materiálům, hliníkovým slitinám a problematice jejich obrábění.

Experimentální část popisuje přípravu experimentů a jejich výsledky. Zabývá se přípravou polotovaru, volbou řezných podmínek a procesem obrábění. Dále popisuje stroje a zařízení, které byly využity v rámci měření.

Závěrečná část zhodnocuje a diskutuje výsledky získané v rámci výzkumu.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. Soustružení

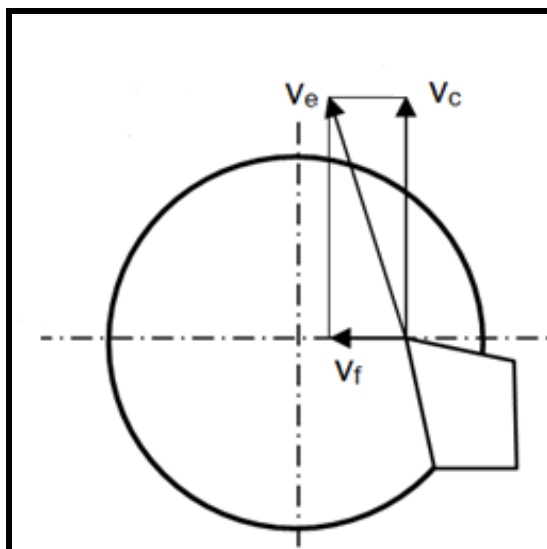
Z mnoha hledisek představuje soustružení nejjednodušší způsob obrábění a také velmi frekventovanou metodu ve strojírenství. Soustružení je používáno převážně k obrábění rotačních ploch, při němž se k odebrání materiálu obrobku používají převážně jednobřité nástroje, pohybující se obvykle rovnoběžně s osou obrobku; příklad procesu soustružení viz obr. 1. Soustružení je prováděno na strojích zvaných soustruhy nástrojem označovaným jako soustružnický nůž. [6]



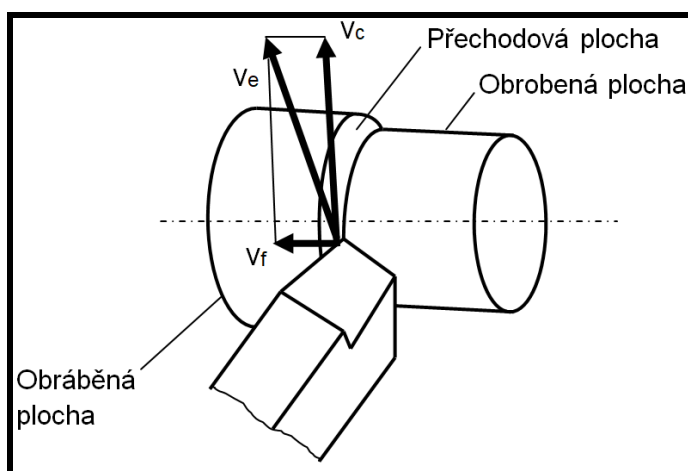
*Obr. 1 – Proces čelního soustružení*

#### 2.1.1. Podélné a čelní soustružení

Hlavní pohyb koná obrobek; posuvový podélný, příčný nebo kombinovaný pohyb je vykonáván nástrojem. Při soustružení válcové plochy se řezný pohyb realizuje po šroubovici za konstantních otáček obrobku  $n$  a konstantní posuvové rychlosti  $v_f$ , viz obr. 3. Řezná rychlost  $v_c$  a rychlost řezného pohybu  $v_e$  je také konstantní. V případě čelního soustružení se nástroj pohybuje kolmo k ose obrobku. Řezný pohyb se při soustružení čelní plochy realizuje po Archimédově spirále. Za konstantních otáček  $n$  a posuvové rychlosti  $v_f$  se řezná rychlost  $v_c$  a rychlost  $v_e$  mění v závislosti na průměru obráběné plochy. Vektory pohybů při soustružení čelní plochy jsou zobrazeny na obr. 2. [6]



Obr. 2 – Vektory pohybů při soustružení čelní plochy [6]

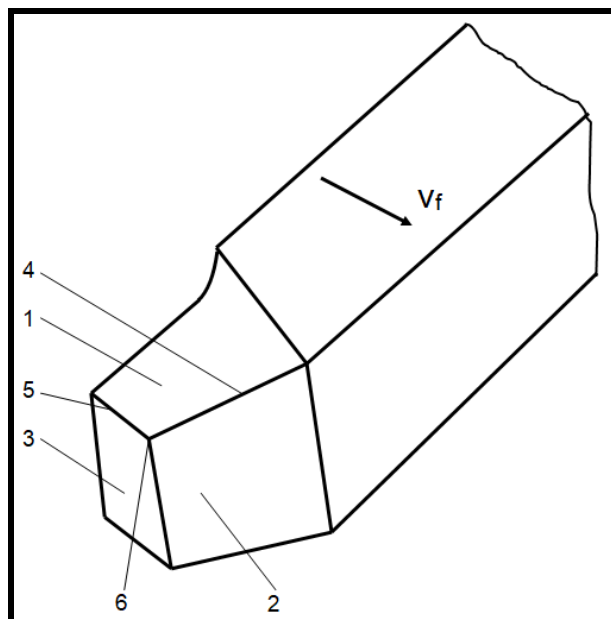


Obr. 3 – Vektory pohybů při válcovém soustružení [6]

### 2.1.2. Geometrie řezného nástroje

Soustružnické nože představují nejfrekventovanější soustružnické nástroje. Lze je třídit z různých hledisek, především však podle materiálu řezné části, tvaru nože a jeho upnutí. Nejrozšířenějšími jsou nože z rychlořezné oceli (dále jen RO) či nože se slinutými karbidy (dále jen SK). [2, 6]

Soustružnický nůž lze rozdělit na část upínací a činnou. V činné části, viz obr. 4, se nachází čelo, po kterém odchází tříska, v rovině čela  $A_\gamma$ . Část nástroje přiléhající k řezné a obrobené ploše se nazývá hřbet. Rozlišujeme hlavní rovinu hřbetu  $A_\alpha$  a vedlejší rovinu hřbetu  $A_{\alpha'}$ . Břit, řezná část nástroje, je tvořen čelem a hřbetem nástroje. Průsečnicí čela a hřbetu je ostří, rozlišuje se hlavní a vedlejší ostří. Špička nástroje leží na spojnici hlavního a vedlejšího ostří. [5]



Obr. 4 – Schéma činné částí soustružnického nože [5]

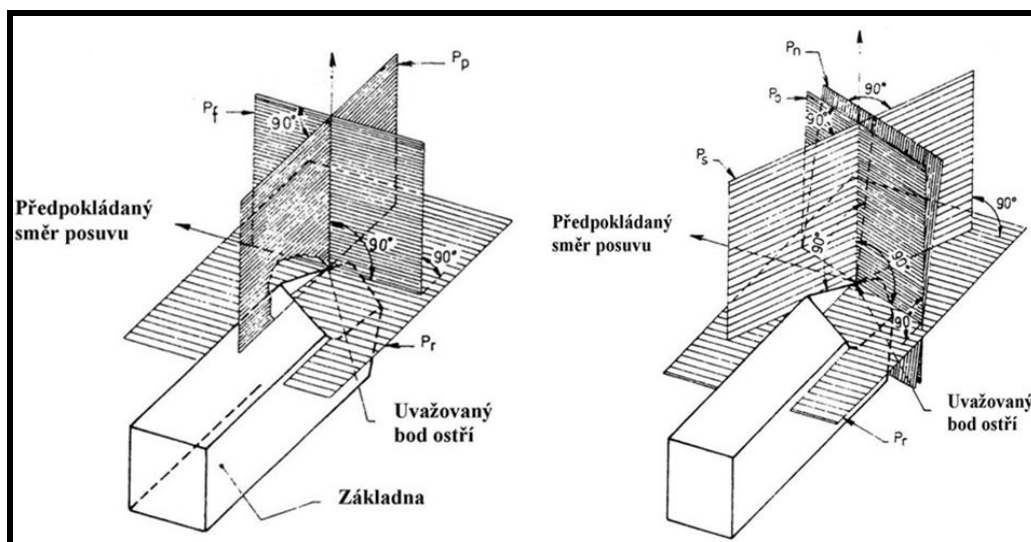
1 – čelo; 2,3 – hřbet; 4 – hlavní ostří; 5 – vedlejší ostří; 6 – špička

#### 2.1.2.1. Nástrojové roviny

- **Nástrojová základní rovina  $P_r$**  – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na vektor řezné rychlosti  $v_c$ .
- **Nástrojová boční rovina  $P_f$**  – prochází uvažovaným bodem a je dána vektorem řezné rychlosti  $v_c$  a posuvu  $v_f$ .
- **Nástrojová zadní rovina  $P_p$**  – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny  $P_r$  a  $P_f$ .
- **Nástrojová rovina ostří  $P_s$**  – je dána tečnou k ostří v uvažovaném bodě a je kolmá na rovinu  $P_r$ .
- **Nástrojová ortogonální rovina  $P_o$**  – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny  $P_r$  a  $P_s$ .
- **Nástrojová normálová (normální) rovina ostří  $P_n$**  – rovina kolmá na tečnu k ostří v uvažovaném bodě.
- **Nástrojová rovina největšího spádu čela  $P_g$**  – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny  $P_r$  a  $A_y$ .

- **Nástrojová rovina největšího spádu hřbetu  $P_b$**  – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny  $P_r$  a  $A_\alpha$ .

Výše popsané nástrojové roviny jsou zobrazeny na obr. 5. [5, 6, 9]



Obr. 5 – Roviny v nástrojové souřadné soustavě [5]

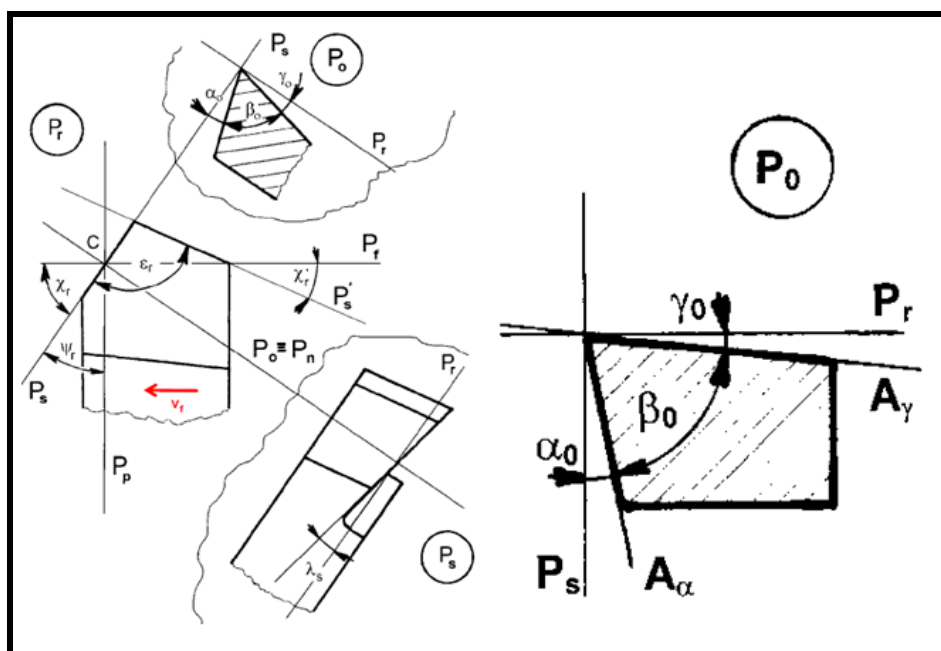
#### 2.1.2.2. Nástrojové úhly

- **Nástrojový úhel nastavení  $\kappa_r$**  – úhel svírají roviny  $P_s$  a  $P_f$ , měří se v rovině  $P_r$ . Ovlivňuje drsnost povrchu obrobku.
- **Nástrojový vedlejší úhel nastavení  $\kappa_r'$**  – úhel svírají roviny  $P_s'$  (rovina procházející vedlejším ostřím) a  $P_f$ , měří se v rovině  $P_r$ . Ovlivňuje drsnost povrchu obrobku.
- **Nástrojový úhel špičky  $\varepsilon_r$**  – úhel svírají roviny  $P_s$  a  $P_s'$ , měří se v rovině  $P_r$ . Platí:  $\kappa_r + \varepsilon_r + \kappa_r' = 180^\circ$ .
- **Nástrojový úhel nastavení doplňkový  $\psi_r$**  – úhel svírají roviny  $P_s$  a  $P_p$ , měří se v rovině  $P_r$ . Platí:  $\kappa_r + \psi_r = 90^\circ$ .
- **Nástrojový úhel sklonu ostří  $\lambda_s$**  – úhel svírá tečna k ostří a rovina  $P_r$ , měří se v rovině  $P_s$ . Ovlivňuje směr odchodu třísky.
- **Nástrojový úhel čela ortogonální  $\gamma_o$**  – úhel svírají roviny  $A_\gamma$  a  $P_r$ , měří se v rovině  $P_o$ . Ovlivňuje ostrost řezného klínu, který vniká do materiálu, a tím i velikost řezné síly a trvanlivost nástroje.



- **Nástrojový úhel břitu ortogonální  $\beta_o$**  - úhel svírají roviny  $A_\gamma$  a  $A_\alpha$ , měří se v rovině  $P_o$ . Ovlivňuje ostrost řezného klínu, který vniká do materiálu, a tím i velikost řezné síly a trvanlivost nástroje.
  - **Nástrojový úhel hřbetu ortogonální  $\alpha_o$**  - úhel svírají roviny  $A_\alpha$  a  $P_s$ , měří se v rovině  $P_o$ . Ovlivňuje ostrost řezného klínu, který vniká do materiálu, a tím i velikost řezné síly a trvanlivost nástroje.
- Platí:  $\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ$ .

Uvedené nástrojové roviny jsou zobrazeny na obr. 6. [5, 6, 9]



Obr. 6 – Úhly v nástrojové souřadné soustavě [5]

### 2.1.3. Vliv geometrie

Vliv úhlů geometrie břitu na řezný výkon je dán tím, jak tyto úhly ovlivňují trvanlivost nástroje. S rostoucím úhlem čela  $\gamma_o$  se zmenšuje práce plastických deformací, práce tření a trvanlivost roste. Nesmí však být překročena hodnota úhlu čela, při níž by se pevnost břitu snížila pod únosnou míru, a mohlo by dojít k mechanické destrukci břitu. Čím menší je úhel nastavení  $\kappa_r$ , tím je intenzita opotřebení menší. Při malých úhlech  $\kappa_r$  je vlivem delšího styku břitu s obráběným materiálem větší odvod tepla a menší tepelné zatížení břitu. [2, 5]

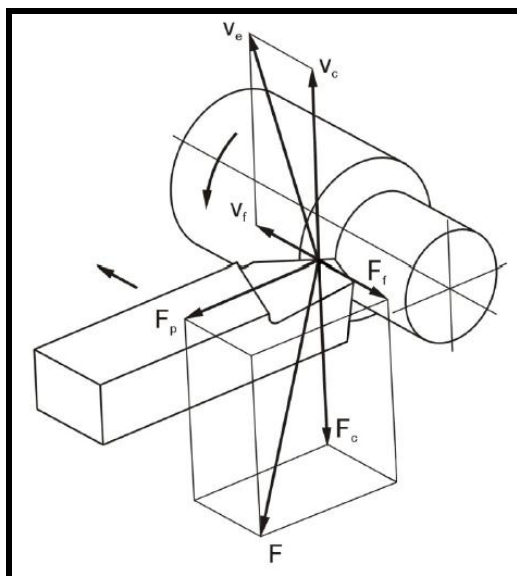
### 2.1.4. Řezná síla

Řezná síla  $F$  se při soustružení obvykle rozkládá do tří složek:  $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ . Rozklad sil je zobrazen na obr. 7. Axiální složka  $F_f$  je vyvozována posuvovým

mechanismem a působí rovnoběžně se směrem podélného posuvu. Složka radiální  $F_p$  působí kolmo na osu obrobku a způsobuje jeho průhyb. Složka  $F_c$  je tečná ke směru hlavního pohybu, slouží k výpočtům výkonu hlavního řezného pohybu a označuje se jako tangenciální síla. Velikost složek  $F_t$ ,  $F_p$ ,  $F_c$  se určuje nejčastěji podle empirických vztahů. Pro jednotlivé složky platí vztahy [2, 5] :

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}}, F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}}, F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}}.$$

Hodnoty konstant a exponentů se určují experimentálně a sestavují se do tabulek. Jejich velikost závisí na obráběném materiálu, řezné rychlosti a geometrii bříty. [2, 5]



Obr. 7 – Rozklad sil na bříty soustružnického nože [5]

### 2.1.5. Řezné podmínky

Řezné podmínky, tj. řezná rychlost, posuv a hloubka řezu, je třeba zvolit tak, aby při obrábění materiálu dané obrobitelnosti nástrojem dané řezivosti byla daná plocha obrobena při dosažení požadovaných parametrů. [5]

Řezná rychlost  $v_c$  používaná při soustružení závisí zejména na vlastnostech obráběného materiálu, řezných vlastnostech materiálu nástroje, jmenovitém průřezu třísky a na zvolené trvanlivosti nástroje. Při soustružení čelní plochy za konstantních otáček obrobku  $n$  a konstantní posuvové rychlosti  $v_f$  se budou řezná rychlost  $v_c$  a rychlost řezného pohybu  $v_e$  měnit v závislosti na aktuálním průměru obráběné plochy. [2, 6]

Posuv na otáčku  $f$  se volí co největší v závislosti na tuhosti obrobku a na požadovaných parametrech struktury povrchu obrobené plochy. Při hrubování se volí posuv  $f = 0,4 \div 0,7 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ . Hloubka záběru ostří  $a_p$  je limitována mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu, tuhostí obrobku a způsobem obrábění. Z hlediska hospodárnosti se volí co největší, pokud možno tak, aby celý přírůstek na obrábění mohl být odebrán na jednu třísku. [9]

## 2.2. Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (dále jen SK) jsou nejpevnějšími materiály mezi tvrdými nástrojovými materiály (mají nejvyšší modul pružnosti a lomovou houževnatost) a mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi, pro těžké přerušované řezy, při teplotách do  $800 \div 900^\circ\text{C}$  a řezné rychlosti  $v_c = 0,5 \div 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Jejich nízká termochemická stabilita neumožňuje aplikace při vyšších řezných rychlostech. [3, 4]

Vlastnosti		Nástrojový materiál		
		SK	Cermet	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$
Měrná hmotnost [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]		12,0÷15,1	5,6÷7,0	4,2÷4,3
Pevnost v ohybu [MPa]		1000÷2400	1150÷1800	600÷900
Tvrdost	[HV]	1900	2000	1000÷2400
	[HRA]	90÷92	91÷93	93÷95
Modul pružnosti [GPa]		520÷660	500	370÷420
Měrná tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]		80	30	20÷25
Lomová houževnatost [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ]		10÷17	10	4,2÷4,5

Tab. 1 – Přehled vlastností vybraných řezných materiálů [3]

### 2.2.1. Nepovlakované SK

Normou ISO jsou standardní SK pro řezné aplikace rozdělovány do třech skupin – s dalším dělením jednotlivých skupin: P (dvoukarbidové), M (vícekarbidové), K (jednokarbidové). Základními karbidy pro výrobu všech základních druhů SK jsou karbid wolframu a karbid titanu, pojícím prvkem je kobalt, dalšími přísadami jsou karbid tantalu, niobu a chromu. [3, 4]

Podstatou procesu výroby SK je lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu a následné slinování při teplotě blízké bodu tavení pojiva. Vzniká materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti výchozích karbidů a který vyniká poměrně vysokou pevností, protože jeho struktura je tvořena pevnou kostrou pojícího kovu, která obklopuje zrna relativně křehkých karbidů. Příklad nástroje s použitým nepovlakovaným SK je zobrazen na obr. 8. [3, 4]



*Obr. 8 – Nástroj s břitovou destičkou z nepovlakovaného SK použitý v experimentu*

### **2.2.2. Povlakované SK**

Nanášením tenké vrstvy materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení na podklad z běžného slinutého karbidu typu P, K nebo M (aktuálně jsou již povlaky většinou nanášeny na speciálně vyrobené podkladové SK) jsou získávány povlakované SK. Metody povlakování se podle principu dělí do dvou základních skupin [3, 4, 13]:

- Metoda PVD – založena na fyzikálním napařování, charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 500°C). Povlak je vytvářen napařováním, naprašováním nebo iontovým plátováním. Používáno pro povlakování nástrojů z RO a SK (v současné době dochází k významnému rozvoji).
- Metoda CVD – založena na chemickém napařování z plynné fáze, probíhá za vysokých teplot (700÷1500°C). Hlavní metoda pro povlakování SK prováděna ve třech variantách: tepelně indukovaná, plazmaticky aktivovaná, fotonově indukovaná.



Obr. 9 – Příklad nástroje s břitovou destičkou z povlakovaného SK [14]

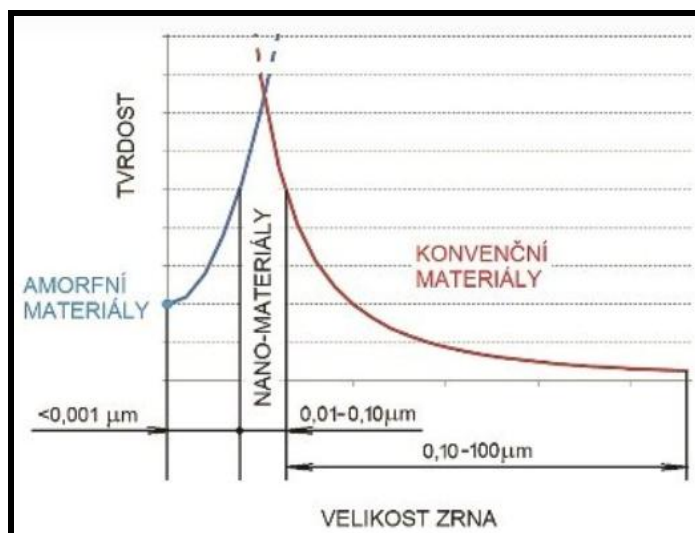
Obvykle uváděné vývojové stupně povlakovaných SK [3, 4, 13]:

- 1. generace: jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou 7  $\mu\text{m}$  a špatnou soudržností podkladu a povlaku, při obrábění rychle docházelo k odlupování povlaku;
- 2. generace: jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez eta-karbidu na přechodu podklad-povlak, vrstva povlaků o největší tloušťce 13  $\mu\text{m}$  bez nebezpečí odlupování při funkci nástroje;
- 3. generace: vícevrstvý povlak s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami, řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem (nejdříve nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, jako poslední vrstvy s horší přilnavostí k podkladu, ale vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení), příklad SK tohoto vývojového stupně viz obr. 9;
- 4. generace: speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev) s více či méně výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace). Výroba takového povlaku je umožněna cíleným řízením atmosféry v povlakovacím zařízení, podle potřeb technologického postupu povlakování.

### 2.2.3. Současný stav SK

Slabým místem SK je pojivo, které bývá z důvodu požadavků vysoké smáčivosti povrchu tvrdých zrn buď kobaltové, nebo niklové. To nabývá na významu s klesající velikostí zrna, která určuje pevnost materiálu,

vyjádřenou například obecným Hall-Petchovým vztahem – viz graf 1. Ten platí pro většinu technických materiálů. V současné době jsou hledány inovace ve velikosti zrn (submikrometrická až nanometrická) a různým podílem vlastních fází (WC, TiC, TaC, atd.), povlaky dominují v určování řezných vlastností soudobých nejrozšířenějších řezných materiálů. Povlakované SK v dnešní době představují 85÷90 % z celkové produkce SK. [12]



Graf 1 – Hall-Petchův vztah [12]

### 2.3. Hliník a jeho slitiny

Významnými fyzikálními vlastnostmi hliníku jsou jeho vysoká elektrická a tepelná vodivost. Teplo se z místa řezu dobře odvádí a nástroj není tak tepelně namáhán. Obrábění hliníkových slitin se vyznačuje nižší spotřebou energie důsledkem menší pevnosti, modulu pružnosti v tahu i ve smyku ve srovnání s oceli. [1, 8]

Důležitou technologickou vlastností hliníkových slitin je obrobitelnost. Ta je dána kombinací velikostí obráběcích sil, charakteru třísek, kvality obrobeného povrchu a životnosti ostří obráběcích nástrojů. Obrobitelnost jednotlivých slitin závisí na jejich složení a jejich struktuře. Nepříznivě působí nekovové vměstky, např. nitridy a karbidy. Naopak obrobitelnost značně zlepšují legující prvky – měď, hořčík, mangan a zinek. Nejčastějšími legujícími prvky slévarenských slitin hliníku jsou křemík, měď a hořčík, výjimečně zinek nebo mangan. Podle nich dělíme slitiny hliníku na siluminy, duraluminium a hydronalium. [1, 8]

Nejlepší obrobitelnost vykazují slitiny Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg a Al-Mg. Běžné slitiny při obrábění tvoří dlouhou třísku, proto nejsou vhodné pro práci na automatech. [1]

Hliník a jeho slitiny patří při obrábění zasucha mezi velmi problémové materiály i přes svoje poměrně nízké mechanické vlastnosti. Je to způsobeno jejich vysokou tepelnou vodivostí a dále výrazným sklonem k adhezi na břit z většiny řezných materiálů. Vlivem první vlastnosti se odvádí značné množství tepla z místa řezu do obrobku a ve spojení s vysokou tepelnou roztažností hliníku vznikají tepelné deformace obrobku. Vzhledem k nízké teplotě měknutí a tavení hliníku se k tomu připojují problémy s utvářením třísky – především ve smyslu jejího odchodu a tvorby nárůstku. [1, 8]

Tendence k tvorbě nárůstku stoupá s rostoucí zrnitostí karbidu wolframu, s rostoucím obsahem kobaltu a drsností řezné hrany a povrchu řezného nástroje. Zvýšení kteréhokoli uvedeného parametru se projeví ve zvýšeném nalepování hliníku na řezný nástroj. U nástrojů s povrchovou úpravou diamantovým mikroleštěním se v důsledku nižší drsnosti adheze snižuje. Dalšímu nalepování hliníku lze zamezit aplikací ochranných vrstev s nízkým koeficientem tření  $\mu = 0,1 \div 0,2$  (např.  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{MoS}_2$ , DLC vrstvy). Obdobný antiadhezní účinek mají i diamantové povlaky nebo polykrystalický diamant. [1, 8]

Problém nalepování hliníku při obrábění standardními řeznými nástroji z SK je všeobecně známý. Proto, aby mohly být úspěšně prováděny obráběcí operace, je nezbytné používat nástroje s vhodnou ochrannou vrstvou snižující adhezi, popř. používat mazání mlhou (MQL) nebo procesní kapalinou (dále jen PK). [1,3]

### **2.3.1. Procesní média (dále jen PM)**

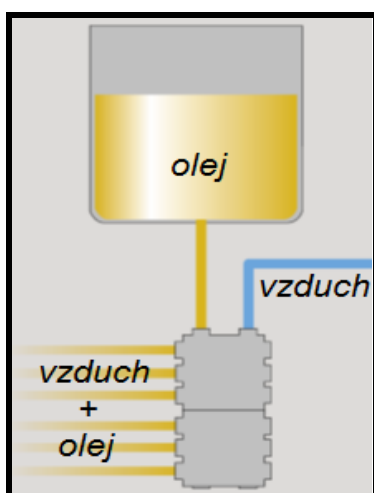
PK zajišťují trvanlivost nástrojů a jakost obráběného povrchu při malé spotřebě energie, na což má vliv chladicí a čistící účinek kapalin. Hospodárnost procesu spočívá také v nízkých pořizovacích nákladech a nákladech na úpravu kapalin. Nesmí zde rovněž docházet ke korozivnímu narušování částí strojů. Mezi sledované vlastnosti PK patří chladicí, mazací, čistící a ochranný účinek nebo provozní stálost. [6, 7]

### 2.3.1.1. Procesní kapaliny

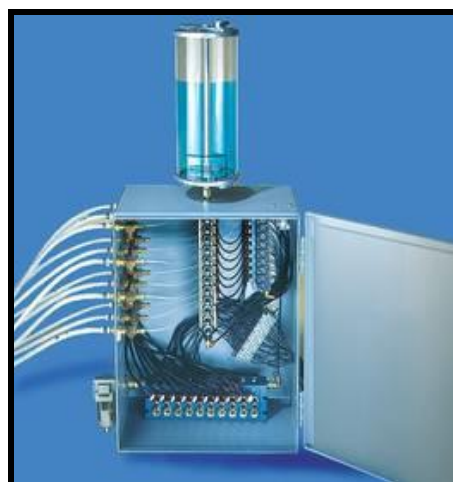
Chlazení PK je v současné době nejrozšířenější způsob chlazení v průmyslu, které se převážně uskutečňuje s použitím kapalin vodou mísitelnými (vodné roztoky, emulze, polysyntetické a syntetické kapaliny) a kapalin vodou nemísitelných (mastné oleje a tuky, minerální oleje, zušlechtěné řezné oleje). PK kombinují chladící i mazací účinek a dle poměru složení lze jeden či druhý účinek zvýšit. [6, 7]

### 2.3.1.2. Metoda MQL

Chlazení MQL je chlazení pomocí stlačeného vzduchu (z prvního zásobníku) a PK, které je přisávána v minimálním množství (z druhého zásobníku). Metoda MQL (Minimal Quantities of Lubricant) je nová varianta u nás již dříve známé metody mazání mlhou, zobrazeno na obr. 10. Tento princip je používán především tam, kde není možné obrábět zcela za sucha nebo nelze použít větší množství PK. Jedním z průmyslově využívaných zařízení se nazývá ACCU-LUBE, jak zobrazuje obr. 11. [7]



Obr. 10 – Schéma zařízení metody MQL [7]



Obr. 11 – Zařízení ACCU-LUBE [7]



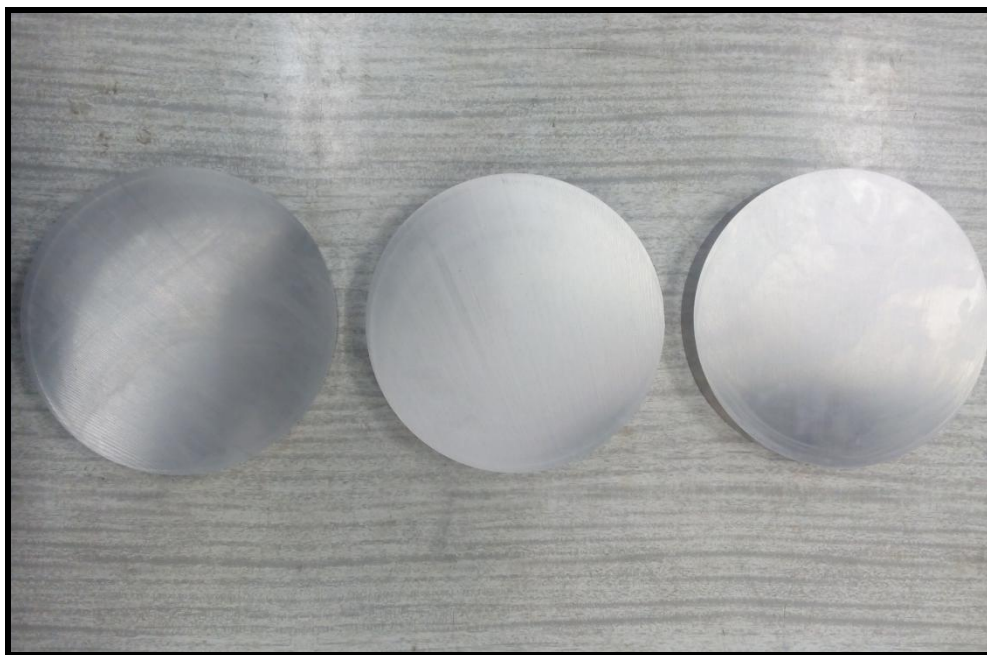
### 3. METODIKA MĚŘENÍ A HODNOCENÍ EXPERIMENTU

Experimentální část je zaměřena na samotný experiment, který zkoumá vliv geometrie řezného nástroje a řezných podmínek na čelní soustružení na řezné síly a drsnost obrobených ploch. Nejprve jsou v této kapitole popsány vzorky, dále zařízení, která byla k dílčím experimentům použita, a pomůcky. Poté následuje samotná metodika experimentu. V závěru této podkapitoly jsou uvedeny dosažené výsledky při dílčích experimentech.

Všechny přípravy a experimenty probíhaly v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci. Zde také probíhala veškerá měření.

#### 3.1. Zkušební vzorky

Pro experimentální část bylo vytvořeno 7 vzorků. Vzorky o průměru 230 mm a tloušťce 60 mm byly nařezány z polotovaru na pásové pile. Zkušební vzorky jsou zobrazeny na obr. 12. Ideální podmínky pro soustružení hliníkových slitin SK byly vybrány dle literatury [3]. Řezné podmínky, za kterých bude obráběn každý vzorek, se zvolily dle literatury a dle zkušeností s výrobním strojem.



*Obr. 12 – Zkušební vzorky*

Zkušební vzorky byly zhotoveny z materiálu EN AW 2030. Jedná se o slitinu  $\text{AlZn}_6\text{Mg}_2\text{Cu}$ , dle ČSN 424222. Tento materiál je používán pro výrobu válcovaných polotovarů (profily, tyče, plechy), volných a zápusťkových výkovků a v leteckém průmyslu. Slitina je určena pro vysoce namáhané konstrukce dlouhodobě pracující do teploty  $100\div 120\text{ }^\circ\text{C}$ , v letecké výrobě pro podélná žebra, výztuže a přepážky. Používá se pouze ve stavu vytvrzeném za tepla. [10]

### 3.2. Popis strojů, nástrojů, měřících zařízení a pomůcek

V této podkapitole jsou popsány všechny stroje, přípravky, měřidla a měřící zařízení, které byly použity pro přípravu zkušebních vzorků a pro samotné měření dílčích experimentů. Všechny stroje, přípravky, měřidla a měřící zařízení byly k dispozici v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci. Zde také probíhala všechna měření.

#### 3.2.1. Pásová pila

Vzorky byly nařezány z polotovaru o průměru 230 mm na tloušťku 60 mm. K tomu byla použita pásová pila na kov typu ARG 300 Plus H.F. od firmy Pilous. Parametry pily jsou uvedeny v tabulce 1.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Rozměr pilového pásu	3 110x27x0,9	[mm]
Maximální rozměr řezu čtvercového průřezu $90^\circ$ ; $40^\circ$ ; $60^\circ$	300/230/150	[mm]
Maximální rozměr řezu kruhového průřezu $90^\circ$ ; $40^\circ$ ; $60^\circ$	300/240/155	[mm]
Výkon motoru 400 V	2,3	[kW]
Rychlost pilového pásu	15 - 90	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$
Rozměry stroje	1600x950x1600	[mm]
Hmotnost stroje	570	[kg]

Tab. 2 – Parametry pásové pily na kov typu ARG 300 Plus H. F. [11]



Obr. 13 – Pásová pila na kov

### 3.2.2. Soustruh

Experimentální část bakalářské práce se uskutečnila s použitím univerzálního hrotového soustruhu SU50, který je součástí strojního vybavení laboratoře Katedry obrábění a montáže TU v Liberci. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 3.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Oběžný průměr nad ložem	500	[mm]
Oběžný průměr nad suportem	250	[mm]
Průměr sklíčidla	250	[mm]
Největší průřez nože	32x32	[mm]
Počet stupňů otáček vřetena	22	[-]
Rozsah otáček vřetena	11,2-1400	[min <sup>-1</sup> ]
Rozsah podélného posuvu	0,027-3,8	[mm·ot <sup>-1</sup> ]
Rozsah příčného posuvu	0,013-1,9	[mm·ot <sup>-1</sup> ]
Počet motorů pro hlavní pohon stroje	2	[-]
Výkon motoru pro hlavní pohon stroje	2x5,5	[kW]
Otáčka motoru pro hlavní pohon stroje	1400	[ot·min <sup>-1</sup> ]

Tab. 3 – Parametry soustruhu SU50 [7]

### 3.2.3. Soustružnický nůž

Pro obrábění vzorků byl použit soustružnický nůž 2020 P 10 ISO 7L ČSN 3717 od firmy Narex. Jedná se o soustružnický nůž stranový, levý s pájenou břitovou destičkou z SK typu P. Během experimentu byly použity 3 nože tohoto typu, každý s pozměněnou geometrií.



Obr. 14 – Soustružnický nůž

### 3.2.4. Nástrojová bruska

Soustružnické nože s požadovanou geometrií byly připraveny na nástrojové brusce od firmy Zbrojovka Brno.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Typ stroje	EBN 2-C	[-]
Hmotnost stroje	840	[kg]
Příkon motoru	4,8	[kW]
Rok výroby	1973	[-]

Tab. 4 – Parametry brusky



Obr. 15 – Nástrojová bruska

### 3.2.5. Dynamometr Kistler

K měření velikosti řezných sil byl při experimentu použit piezoelektrický dynamometr Kistler s označením 9265B. Tento dynamometr využívá pro zjišťování zatěžující síly tzv. piezoelektrického jevu.

Měřicí soustava řezných sil se skládá z více komponentů. Dynamometr Kistler vytvoří při zatížení elektrický náboj. Informace o elektrickém náboji dále putují optickým kabelem do nábojového zesilovače 5019B. Zesilovač pak dále pošle data do počítače, ve kterém je nainstalovaný program Labview 6.1. Ten data zpracuje a finálně z nich vytvoří potřebné grafy.



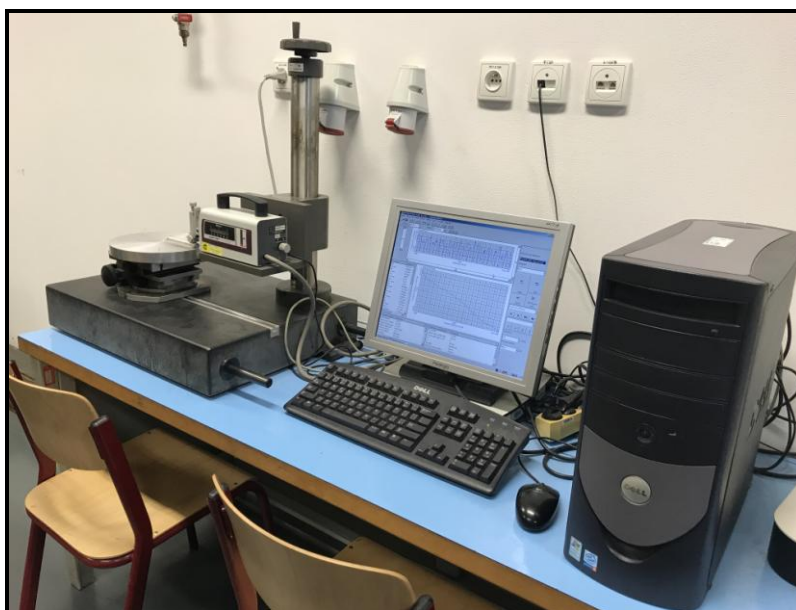
Obr. 16 – Dynamometr Kistler



Obr. 17 – Nábojový zesilovač 5019B

### 3.2.6. Laboratorní profiloměr Mitutoyo

Jakost povrchu při dílčích experimentech jednotlivých vzorků byla měřena na laboratorním profiloměru Mitutoyo SV-2000 N2. Profiloměr pracuje na principu dotykového snímání povrchu. Data jsou poté vyhodnocena na počítači v softwarovém programu Surfpak-SV Verze 1.100, který vytvoří textovou i grafickou formu dat. Na profiloměru byly zkoumány vybrané parametry profilu  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$ .



Obr. 18 – Profiloměr Mitutoyo SV 2000N2 s pracovní stanicí Surfpak SV Verze 1.100

### 3.2.7. Ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC

Pro ověření správné koncentrace naředěné procesní kapaliny byl použit ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC s přesností měření  $\pm 0,15$  %.





*Obr. 19 – Ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC*

### **3.2.8. Aparatura pro dávkování procesní kapaliny**

K zajištění dávkování požadovaného množství PK označené jako Zubora Universal byla použita vhodná aparatura připevněná k příčnému supportu soustruhu, viz obr. 20.



*Obr. 20 – Aparatura pro dávkování procesní kapaliny*

### **3.2.9. Aparatura MQL**

V experimentu s využitím MQL byla potřeba aparatura k zajištění dávkování maziva Accu-Lube LB-2000. Tato aparatura byla připevněna k dynamometru, zobrazeno na obr. 21.



*Obr. 21 – Aparatura pro metodu MQL*

### **3.2.10. Procesní kapalina Zubora Universal**

Zubora Universal je procesní kapalina vhodná k použití při obrábění ocelí, hliníků a neželezných kovů. Jedná se o dlouhodobě stabilní, vodou mísitelnou procesní kapalinu založenou na minerálních olejích s vysokou ochranou vůči korozi. K ověření koncentrace pro obrábění 5÷7 % byl použit ruční refraktometr.



*Obr. 22 – Procesní kapalina Zubora Universal*

### **3.2.11. Mazivo Accu-Lube LB-2000**

Mazivo Accu-Lube LB-2000 je vyrobeno z přírodních triglyceridů získaných rafinací rostlinných olejů. Používá se v neředěném stavu. Mazivo je určeno zvláště pro použití v mikromazacích dávkovacích systémech, jako náhrada cirkulujícího technologického média.

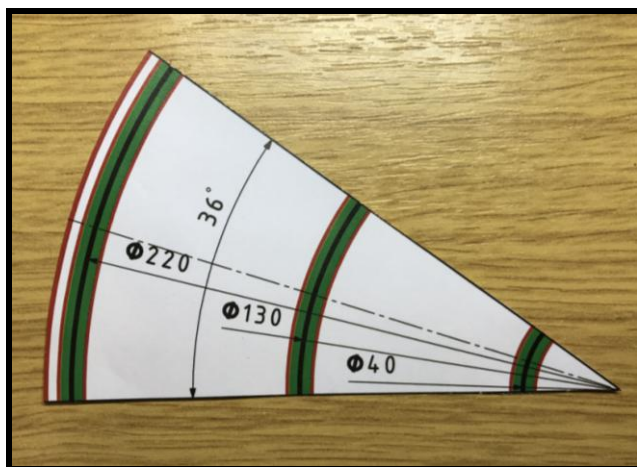




Obr. 23 – Mazivo Accu-Lube LB-2000

### 3.2.12. Papírová úhlová příložka

K zajištění rovnoměrného rozložení měřených oblastí drsnosti obrobku byla zhotovena papírová úhlová příložka. Na příložce jsou naneseny důležité měřené průměry s měřenou oblastí profiloměru.



Obr. 24 – Papírová úhlová příložka

### 3.3. Řezné podmínky experimentu

Řezné podmínky pro měření velikosti řezných sil při čelním soustružení jsou zaneseny do tabulky 5. Ideální řezné podmínky pro soustružení hliníkových slitin slinutými karbidy byly zvoleny dle literatury [3]. Následné řezné podmínky byly nadefinovány dle potřeb experimentu.

Pořadí	Řezné podmínky	Poznámka
1.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM	Ideální podmínky
2.	$n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM	Změna otáček
3.	$n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM	Změna otáček
4.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM	Změna posuvu
5.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM	Změna posuvu
6.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_{p1} = 1 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM	Změna hloubky záběru
7.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_{p2} = 4 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM	Změna hloubky záběru
8.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_{o1} = -10^\circ$ , bez PM	Změna geometrie nástroje
9.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_{o2} = 0^\circ$ , bez PM	Změna geometrie nástroje
10.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , MQL	Změna procesního média
11.	$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , PK	Změna procesního média

Tab. 5 – Zvolené řezné podmínky pro měření řezných sil

### 3.4. Metodika experimentů

#### 3.4.1. Příprava vzorků

Zkoumané vzorky byly nařezány z polotovaru o průměru 230 mm na tloušťku 60 mm pomocí pásové pily. Celkem bylo nařezáno 7 vzorků.

#### 3.4.2. Příprava nástrojů

Soustružnické nože byly jednotlivě upnuty na pracovní stůl nástrojové brusky s elektromagnetickým upínáním a byly nabroušeny na požadovanou hodnotu nástrojového úhlu čela - ortogonálního  $\gamma_o$ .

#### 3.4.3. Příprava PM

Procesní kapalina Zubura Universal byla naředěna v aparatuře pro dávkování procesní kapaliny dle pokynů výrobce. Výsledná koncentrace byla ověřena odebráním vzorku kapaliny a změřena pomocí ručního refraktometru. Výsledná koncentrace byla 6 %.

Použité mazivo pro metodu MQL bylo doplněno v neřaděném stavu do zásobníku aparatury.

#### 3.4.4. Proces soustružení

Pro soustružení byl použit univerzální hrotový soustruh. Před zahájením experimentu byly vzorky zarovnány za ideálních řezných podmínek, viz tab. 5, a následně byly obráběny dle nadefinovaných řezných podmínek, viz tab. 5.

Vzorky obráběné řeznými podmínkami 1, 2, 3, uvedenými v tab. 5, byly soustruženy pouze z jedné strany. Zbylé vzorky byly osoustruženy z obou stran.

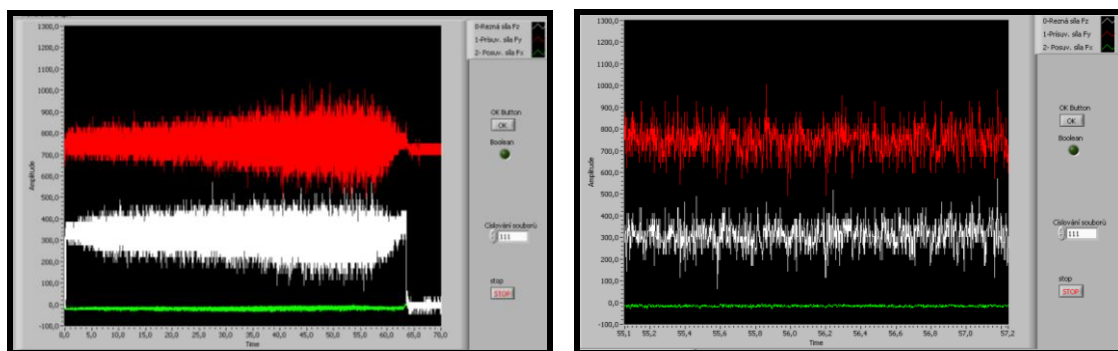
### 3.4.5. Sledování nárůstu

Po provedení 5 experimentů na každém vzorku danými řeznými podmínkami byl pořízen snímek nástroje se vzniklým nárůstkem. Snímky byly orientační, slouží pouze k optickému porovnání vlivu jednotlivých řezných podmínek na nástroj.

### 3.4.6. Řezné síly

Experimenty byly provedeny za podmínek popsanych v tab. 5. Řezné síly byly zkoumány u všech vzorků na průměrech 40 mm, 130 mm a 220. Pro tyto průměry a jednotlivé řezné podmínky byla vypočtena příslušná řezná rychlost. Z jednotlivých záznamů působících sil byly zjištěny hodnoty sil  $F_p = F_x$  a  $F_c = F_z$ . Z daných podmínek byl vypočten strojní čas pro dané průměry a z celkového záznamu měření dynamometrem byly blíže zkoumány potřebné časové úseky pro stanovení řezných sil. Výpočty a záznamy měření jsou uvedeny v příloze 1.

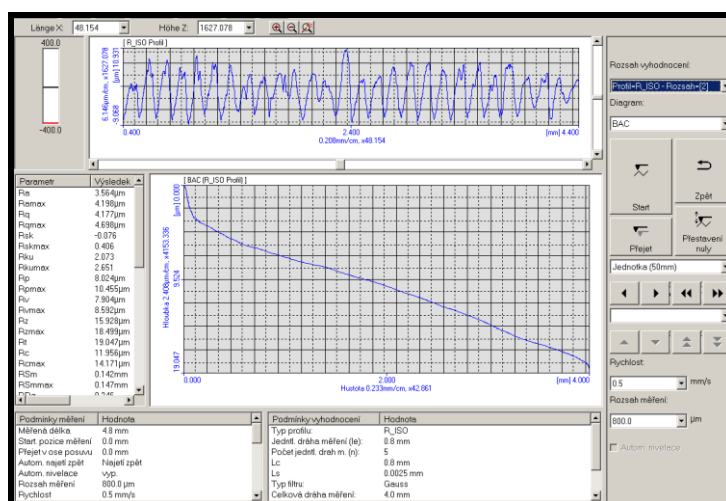
Pro jednotlivé zvolené řezné podmínky bylo uskutečněno celkem 5 opakování měření pro eliminaci chyby měření. Z provedených měření byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.



Obr. 25 – Záznamy řezných sil

### 3.4.7. Drsnost povrchu vzorků

Drsnost jednotlivých obrobených ploch byla měřena na 3 měřených průměrech 40 mm, 130 mm a 220 mm. Pro každý z průměrů byla na 10 místech vyznačena měřená oblast pomocí papírové úhlové příločky. Z naměřených hodnot parametrů  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$  byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.



Obr. 26 – Záznam drsnosti povrchu

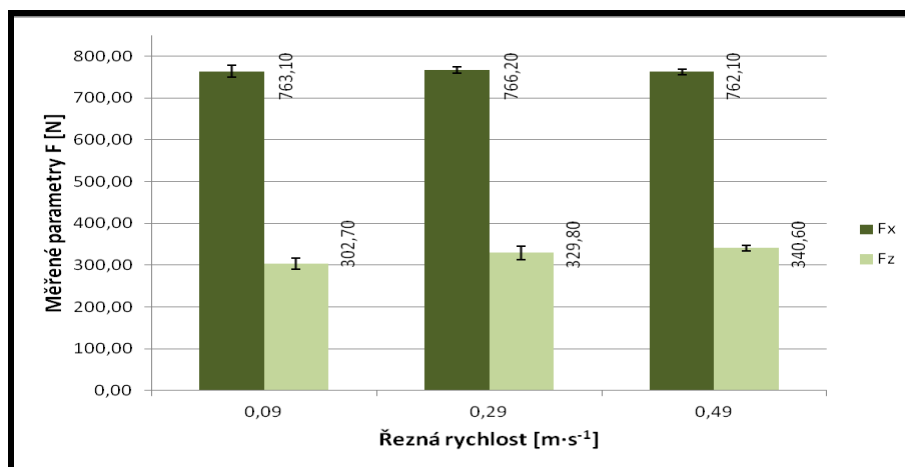
### 3.5. Vyhodnocení výsledků měření řezných sil

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření řezných sil při stanovených řezných podmínkách, viz tab. 5 kap. 2.3.

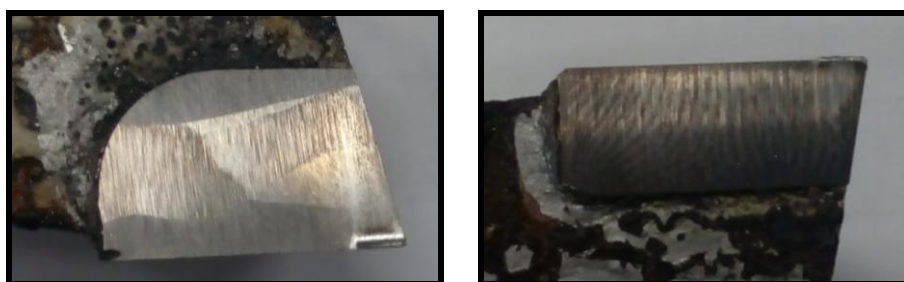
#### 3.5.1. Řezné síly – ideální podmínky

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{cn\_40}$	0,09	763,10	$\pm 14,30$	302,70	$\pm 13,38$
$v_{cn\_130}$	0,29	766,20	$\pm 7,71$	329,80	$\pm 16,23$
$v_{cn\_220}$	0,49	762,10	$\pm 6,24$	340,60	$\pm 6,50$

Tab. 6 – Působící síly při ideálních řezných podmínkách



Graf 2 – Působící síly při ideálních řezných podmínkách



Obr. 27 – Vzniklý nárůstek – ideální řezné podmínky

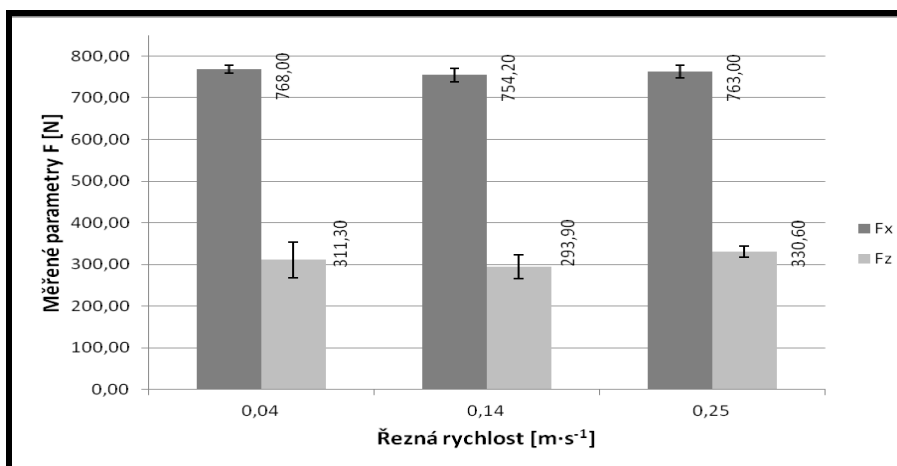
Z hlediska zvolených ideálních řezných podmínek byly naměřeny nejmenší řezné síly  $F_p$  řádově okolo 760 N a síly  $F_c$  řádově okolo 300 N.

Z obrázku 27 a z informací uvedených v kapitole 3.3 je patrný relativně velký vznik nárůstu oproti experimentům s použitím procesních médií uvedených v kapitolách 3.5.10 a 3.5.11.

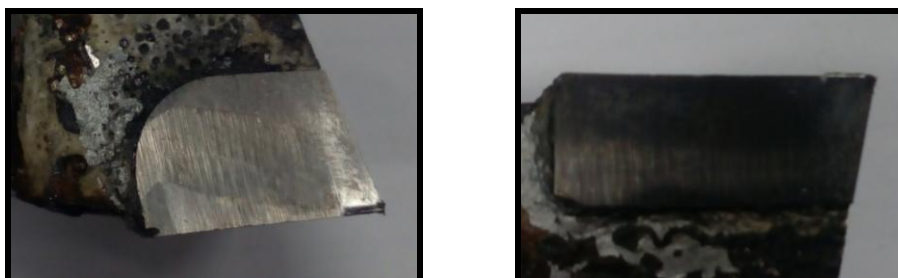
### 3.5.2. Řezné síly – $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky: $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{cn1\_40}$	0,04	768,00	$\pm 9,63$	311,30	$\pm 42,86$
$v_{cn1\_130}$	0,14	754,20	$\pm 16,28$	293,90	$\pm 28,49$
$v_{cn1\_220}$	0,25	763,00	$\pm 15,79$	330,60	$\pm 13,87$

Tab. 7 – Působící síly při otáčkách  $n_1$



Graf 3 – Působící síly při otáčkách  $n_1$



Obr. 28 – Nárůstek – otáčky  $n_1$

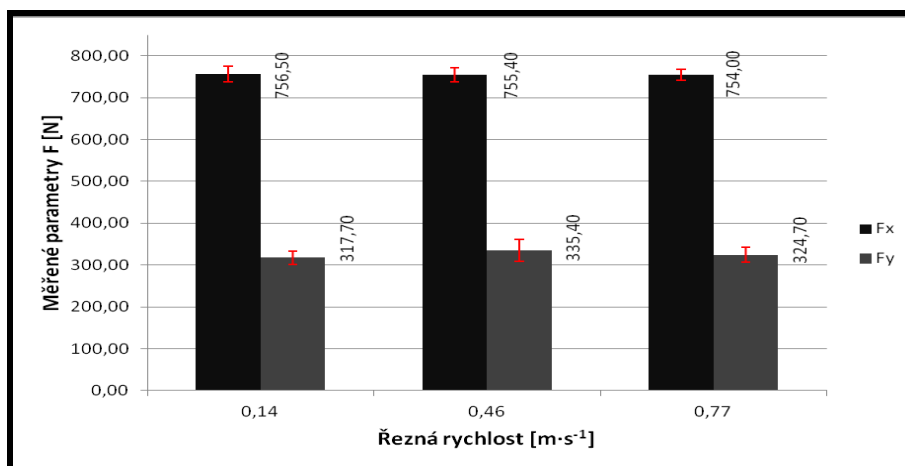
Z tab. 7 a grafu 3 je zřejmé, že se velikosti sil  $F_c$  a  $F_p$  výrazně změnily na průměru 130 mm (řezná rychlost  $v_{cn1\_130}$ ) oproti kapitole 3.5.1. Při nastavených ideálních řezných podmínkách byly naměřeny nejmenší hodnoty sil  $F_c = 302,70 \text{ N}$ ,  $F_p = 762,10 \text{ N}$  a při snížení velikosti otáček na hodnotu  $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  byly naměřeny nejmenší hodnoty sil  $F_c = 293,90 \text{ N}$  a  $F_p = 754,20 \text{ N}$ .

Vzniklý nárůstek vykazuje stejnou velikost jako u experimentu za použití ideálních řezných podmínek.

### 3.5.3. Řezné síly – $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky: $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$V_{cn2\_40}$	0,14	756,50	$\pm 18,02$	317,70	$\pm 15,87$
$V_{cn2\_130}$	0,46	755,40	$\pm 16,73$	335,40	$\pm 26,73$
$V_{cn2\_220}$	0,77	754,00	$\pm 13,35$	324,70	$\pm 18,12$

Tab. 8 – Působící síly při otáčkách  $n_2$



Graf 4 – Působící síly při otáčkách  $n_2$



Obr. 29 – Nárůstek – otáčky  $n_2$

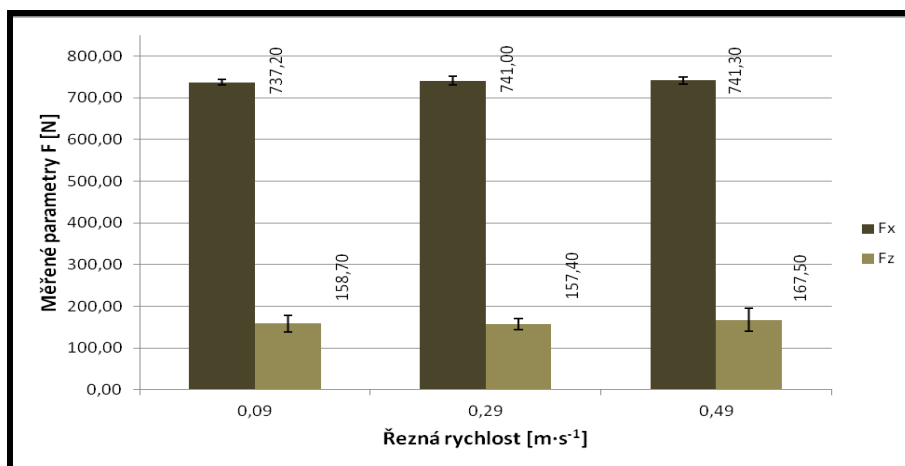
U experimentu se zvýšením velikosti otáček na hodnotu  $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  došlo k poklesu sil  $F_p$  na zkoumaných průměrech vůči kap. 3.5.1. Velikosti sil  $F_c$  vykazují téměř stejné hodnoty jako u kapitoly 3.5.2, pouze na měřeném průměru 130 mm došlo k nárůstu velikosti síly  $F_c$  o 40 N.

Oproti kapitolám 3.5.1 a 3.5.2 nedošlo k výrazné změně velikosti nárůstku vzniklého při obrábění.

### 3.5.4. Řezné síly – $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{\text{cn}_40}$	0,09	737,20	$\pm 7,31$	158,70	$\pm 20,12$
$v_{\text{cn}_130}$	0,29	741,00	$\pm 11,15$	157,40	$\pm 13,02$
$v_{\text{cn}_220}$	0,49	741,30	$\pm 9,22$	167,50	$\pm 26,78$

Tab. 9 – Působící síly při posuvu  $f_1$



Graf 5 – Působící síly při posuvu  $f_1$



Obr. 30 – Nárůstek – posuv  $f_1$

Řezné podmínky č. 4, uvedené v tabulce 5, vykazují výrazný pokles hodnot řezných síly  $F_c$  vůči ideálním řezným podmínkám, viz kap. 3.5.1. Při nastavení hodnoty  $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$  byly naměřeny nejmenší síly  $F_c$  a  $F_p$  v řádech 160 N a 740 N.

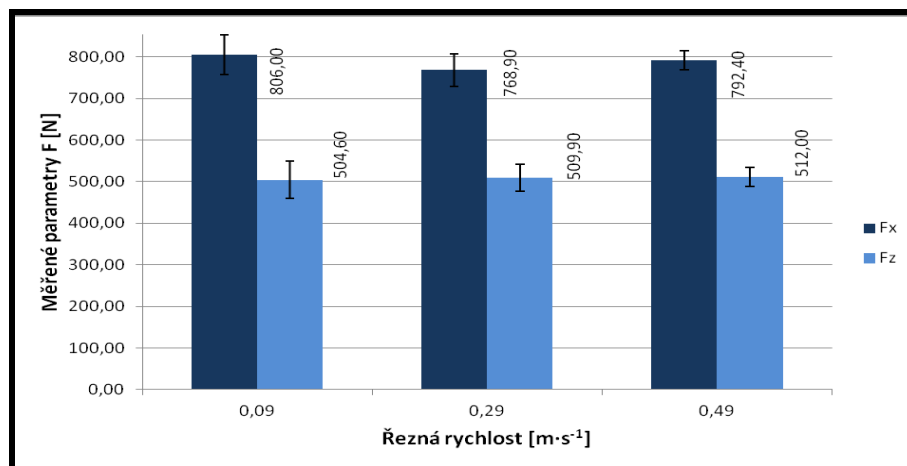
Výrazný vliv nastavených podmínek je patrný i u velikosti nárůstku, který je oproti předchozím popsáním experimentům výrazně menší.



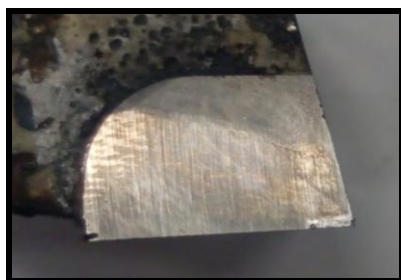
### 3.5.5. Řezné síly – $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{\text{cn}_40}$	0,09	806,00	$\pm 48,05$	504,60	$\pm 45,46$
$v_{\text{cn}_130}$	0,29	768,90	$\pm 39,55$	509,90	$\pm 32,32$
$v_{\text{cn}_220}$	0,49	792,40	$\pm 22,18$	512,00	$\pm 22,66$

Tab. 10 – Působící síly při posuvu  $f_2$



Graf 6 – Působící síly při posuvu  $f_2$



Obr. 31 – Nárůstek – posuv  $f_2$

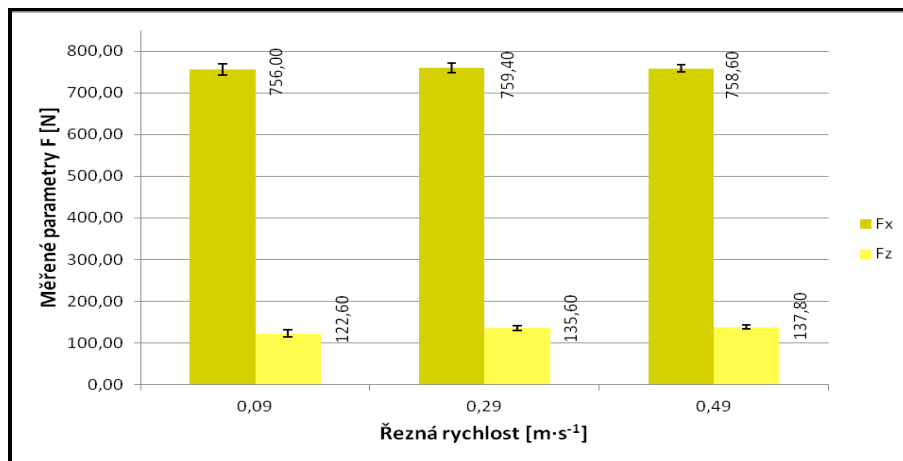
Nastavení posuvu na hodnotu  $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$  způsobilo nárůst obou měřených řezných sil vzhledem k ideálním řezným podmínkám, uvedeno v tabulce 5. Byly naměřeny minimální hodnoty  $F_c = 504,60 \text{ N}$  a  $F_p = 768,90 \text{ N}$ . Oproti ideálním řezným podmínkám se jedná o nárůst v řádech 200 N pro řeznou a 10 N pro přísuvovou sílu.

Z obr. 31 je patrné, že nedošlo k vytvoření souvislé délky nárůstku, vznikl pouze lokálně. Velikost vzniklého nárůstku je oproti předchozím uvedeným experimentům zanedbatelná.

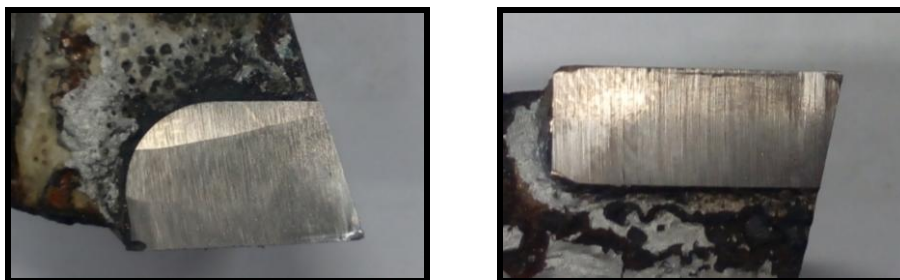
### 3.5.6. Řezné síly – $a_{p1} = 1\text{ mm}$

Řezné podmínky: $n = 710\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ , $f = 0,15\text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ , $a_{p1} = 1\text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{cn\_40}$	0,09	756,00	$\pm 14,19$	122,60	$\pm 8,87$
$v_{cn\_130}$	0,29	759,40	$\pm 11,47$	135,60	$\pm 6,41$
$v_{cn\_220}$	0,49	758,60	$\pm 8,19$	137,80	$\pm 4,75$

Tab. 11 – Působící síly při hloubce záběru  $a_{p1}$



Graf 7 – Působící síly při hloubce záběru  $a_{p1}$



Obr. 32 – Nárůstek – hloubka záběru  $a_{p1}$

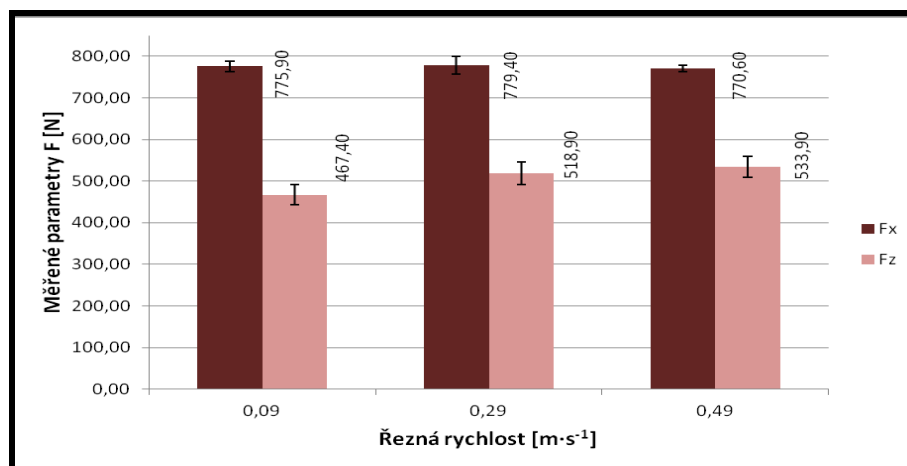
Nastavením řezných podmínek č. 6, uvedené v kapitole 3.3, bylo docíleno podobných hodnot sil  $F_p$  jako u experimentu v kapitole 3.5.3. Hodnoty sil  $F_c$  mají oproti hodnotám sil v kapitole 3.5.3 poloviční velikost. Nastavením parametru  $a_{p1} = 1\text{ mm}$  bylo dosaženo nejmenších sil  $F_c = 122,60\text{ N}$  a  $F_p = 756,00\text{ N}$ .

Z obr. 32 je zřejmé, že došlo k vytvoření poměrně malého nárůstku v oblasti špičky nástroje.

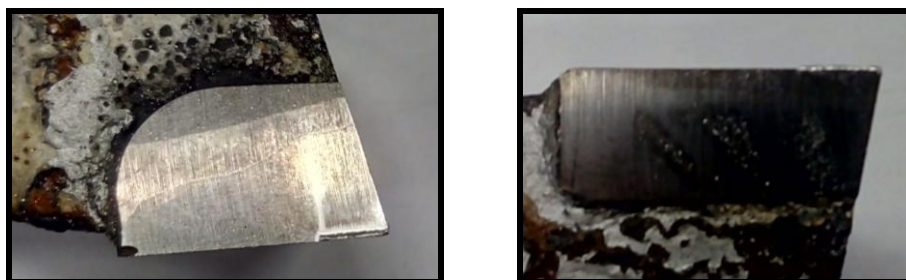
### 3.5.7. Řezné síly – $a_{p2} = 4\text{mm}$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_{p2} = 4 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{cn\_40}$	0,09	775,90	$\pm 12,07$	467,40	$\pm 23,98$
$v_{cn\_130}$	0,29	779,40	$\pm 21,34$	518,90	$\pm 26,31$
$v_{cn\_220}$	0,49	770,60	$\pm 8,01$	533,90	$\pm 24,71$

Tab. 12 – Působící síly při hloubce záběru  $a_{p2}$



Graf 8 – Působící síly při hloubce záběru  $a_{p2}$



Obr. 33 – Nárůstek – hloubka záběru  $a_{p2}$

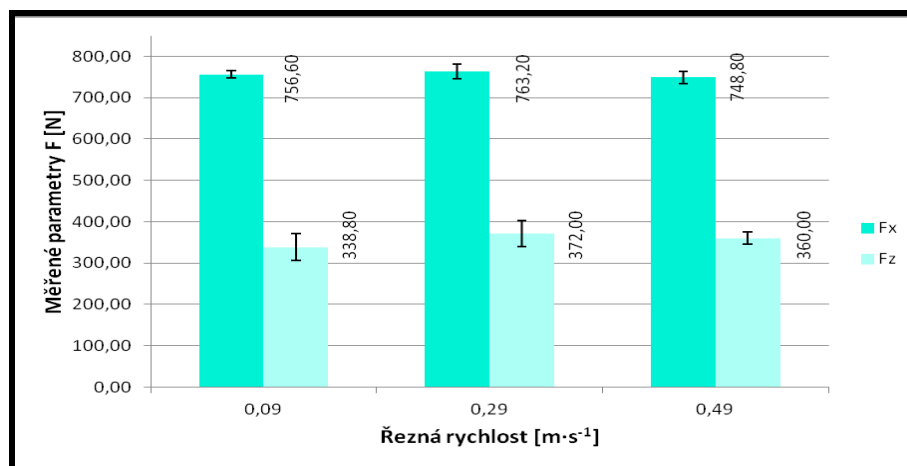
Z tabulky 12 a grafu 8 lze vyčíst minimální hodnoty sil  $F_c = 467,40 \text{ N}$  a  $F_p = 770,60 \text{ N}$ . Ve srovnání s ideálními řeznými podmínkami, viz kap. 3.5.1, došlo u obou měřených sil k nárůstu velikosti sil.

Při obrábění za podmínky  $a_{p2} = 4\text{mm}$  došlo k vzniku, co do délky, největšího nárůstu ze všech použitých podmínek.

### 3.5.8. Řezné síly – $\gamma_{o1} = -10^\circ$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_{o1} = -10^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{cn\_40}$	0,09	756,60	$\pm 8,42$	338,80	$\pm 33,13$
$v_{cn\_130}$	0,29	763,20	$\pm 18,22$	372,00	$\pm 31,40$
$v_{cn\_220}$	0,49	748,80	$\pm 15,38$	360,00	$\pm 14,59$

Tab. 13 – Působící síly při geometrii  $\gamma_{o1}$



Graf 9 – Působící síly při geometrii  $\gamma_{o1}$



Obr. 34 – Nárůstek – geometrie  $\gamma_{o1}$

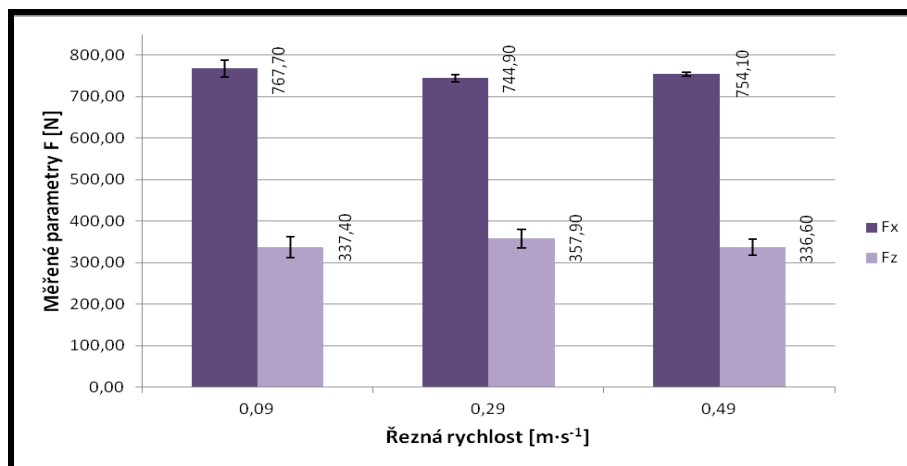
Použitím nástroje s geometrií  $\gamma_{o1} = -10^\circ$  byly naměřeny nejmenší hodnoty sil  $F_c = 338,80 \text{ N}$  a  $F_p = 748,80 \text{ N}$ . Zmíněné síly jsou větší než síly uvedené v kapitole 3.5.1, v případě  $F_c$  síly je nárůst hodnoty v řádu 30 N a v případě síly  $F_p$  je nárůst hodnoty v řádu 20 N.

Velikost vytvořeného nárůstku nabývala přibližně stejné velikosti, jako za ideálních podmínek.

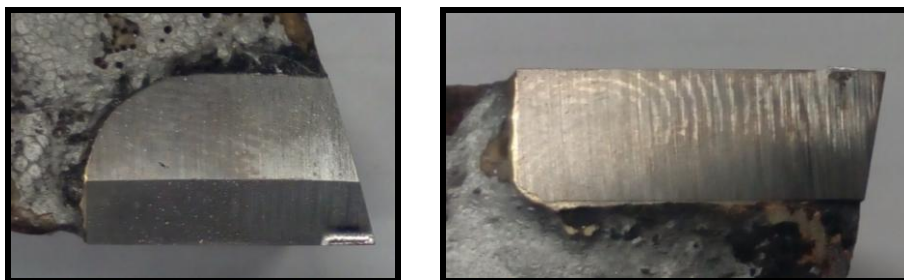
### 3.5.9. Řezné síly – $\gamma_{02} = 0^\circ$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_{02} = 0^\circ$ , bez PM					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{\text{cn}_40}$	0,09	767,70	$\pm 19,96$	337,40	$\pm 24,93$
$v_{\text{cn}_130}$	0,29	744,90	$\pm 8,61$	357,90	$\pm 22,26$
$v_{\text{cn}_220}$	0,49	754,10	$\pm 5,09$	336,60	$\pm 19,48$

Tab. 14 – Působící síly při geometrii  $\gamma_{02}$



Graf 10 – Působící síly při geometrii  $\gamma_{02}$



Obr. 35 – Nárůstek – geometrie  $\gamma_{02}$

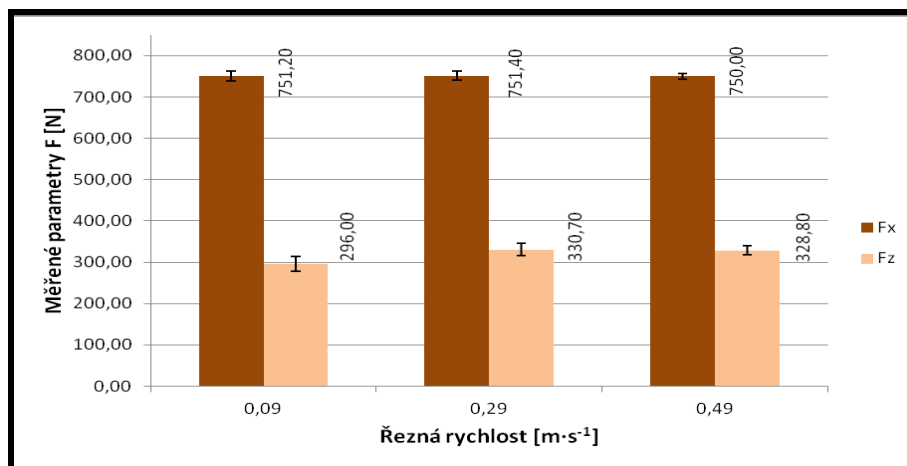
Změnou geometrie řezného nástroje  $\gamma_{02} = 0^\circ$  bylo docíleno řádově stejných hodnot měřených parametrů, jako při obrábění za použití  $\gamma_{01} = -10^\circ$ . Za použití  $\gamma_{02} = 0^\circ$  byly naměřeny minimální hodnoty sil  $F_c = 337,40 \text{ N}$  a  $F_p = 744,90 \text{ N}$ .

Oproti předchozí kapitole 3.5.8 nedošlo k výrazným změnám ve velikosti nárůstku.

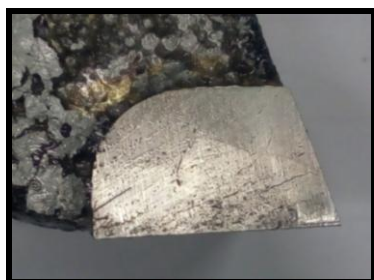
### 3.5.10. Řezné síly – MQL

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , MQL					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{\text{cn}_40}$	0,09	751,20	$\pm 12,03$	296,00	$\pm 18,07$
$v_{\text{cn}_130}$	0,29	751,40	$\pm 11,70$	330,70	$\pm 14,89$
$v_{\text{cn}_220}$	0,49	750,00	$\pm 7,36$	328,80	$\pm 10,89$

Tab. 15 – Působící síly při použití metody MQL



Graf 11 – Působící síly při použití metody MQL



Obr. 36 – Nárůstek – metoda MQL

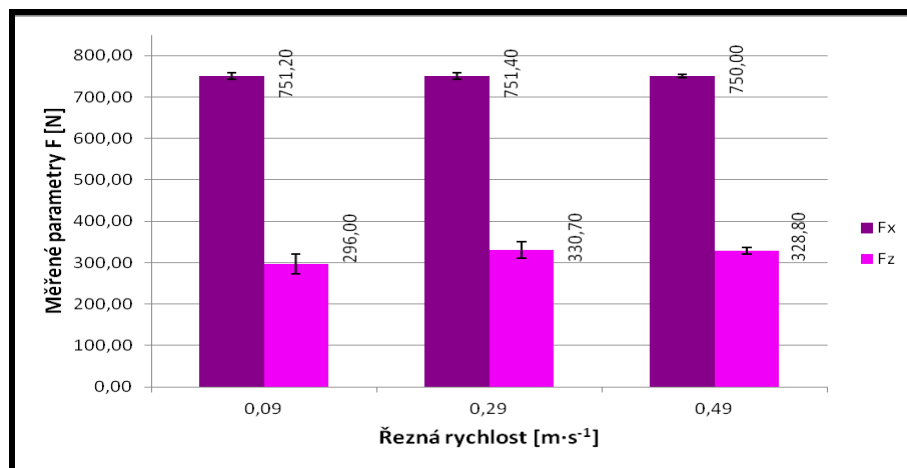
Použití metody MQL mělo pozitivní vliv na snížení velikosti řezných sil a také na zamezení tvorby nárůstku během obrábění. Na základě porovnání dat shrnutých v tabulkách 6 a 15 je patrný pokles velikosti sil v řádu 10 N. Naměřené minimální hodnoty řezných sil při použití metody MQL jsou  $F_c = 296,00 \text{ N}$  a  $F_p = 750,00 \text{ N}$ .

Aplikace mazání mlhou zapříčinila vznik nárůstku, který byl zanedbatelný oproti experimentům popsáným výše.

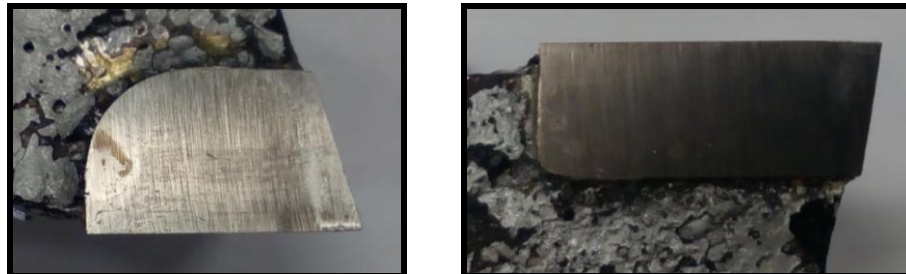
### 3.5.11. Řezné síly – PK

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , PK					
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry F			
		$F_x = F_p$ [N]	Konfidenční interval $F_x$ [N]	$F_z = F_c$ [N]	Konfidenční interval $F_z$ [N]
$v_{\text{cn}_40}$	0,09	749,60	$\pm 7,61$	321,90	$\pm 23,77$
$v_{\text{cn}_130}$	0,29	766,80	$\pm 7,98$	317,50	$\pm 19,07$
$v_{\text{cn}_220}$	0,49	761,30	$\pm 4,18$	327,10	$\pm 7,48$

Tab. 16 – Působící síly při použití PK



Graf 12 – Působící síly při použití PK

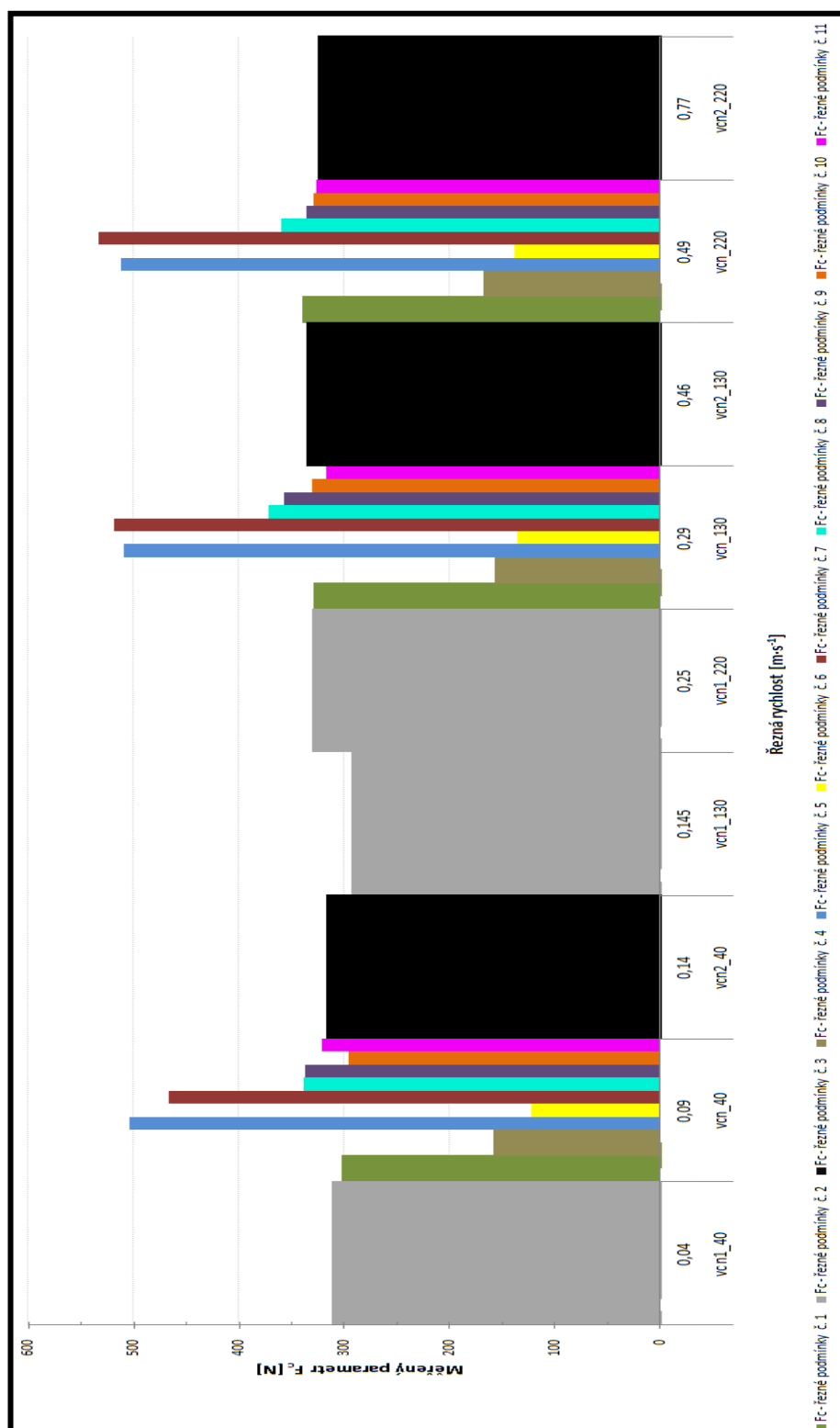


Obr. 37 – Nárůstek – použití PK

Aplikací PK při procesu obrábění bylo dosaženo obdobných hodnot měřených parametrů, jako při použití metody MQL. Byla naměřena minima sil  $F_c = 317,50 \text{ N}$  a  $F_p = 749,60 \text{ N}$ .

Porovnáním obr. 36 s obr. 37 je patrné, že obě dvě metody mají výrazně pozitivní vliv proti tvorbě nárůstku. Stavy obou nástrojů po experimentech jsou srovnatelné.

### 3.5.12. Souhrn výsledků měření řezných sil



Graf 13 – Souhrnný graf naměřených řezných sil  $F_c$

Souhrnný graf 13 obsahuje pouze měřený parametr  $F_c$  z důvodu přehlednosti grafu. Z výše uvedeného grafu jsou patrné nejnižší a nejvyšší naměřené hodnoty zkoumaného parametru řezné síly  $F_c$ .



Nejnižší řezné síly  $F_c$  bylo dosaženo nastavením podmínek č. 6, viz tab. 5. Minimální hodnota  $F_c = 122,60 \pm 8,87$  N odpovídá řezné rychlosti  $v_{cn\_40} = 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Nejvyšší řezné síly  $F_c = 533,90 \pm 24,71$  N bylo dosaženo při řezných podmínkách č. 7, viz tab. 5. Tato síla byla dosažena při řezné rychlosti  $v_{cn\_220} = 0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Řezné podmínky č. 4 viz kapitola 3.3, vykazují nejmenší hodnotu přísluvové síly  $F_p = 737,20 \pm 7,31$  N. Tato minimální hodnota přísluvové síly odpovídá řezné rychlosti  $v_{cn\_40} = 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Změna posuvu nástroje na hodnotu  $f_2 = 0,305 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ , uvedeno v kapitole 3.5.5, negativně ovlivnila velikosti zkoumaných sil  $F_p$ . Největší přísluvová síla  $F_p = 806,00 \pm 48,05$  N byla naměřena při řezné rychlosti  $v_{cn\_40} = 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Z kapitol 3.5.4 a 3.5.6 je patrné, že výše uvedené řezné podmínky č. 4 a č. 6 měly pozitivní vliv proti tvorbě nárůstku.

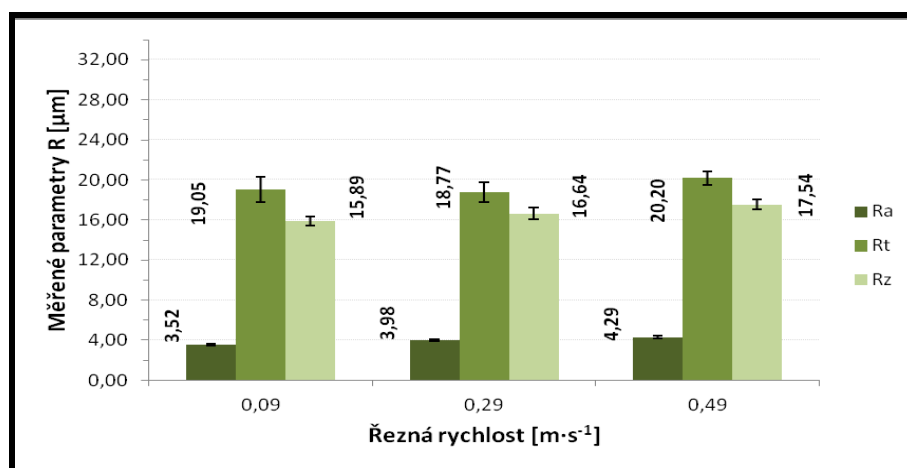
### 3.6. Vyhodnocení výsledků měření drsnosti

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření parametrů drsnosti po obrábění definovanými řeznými, viz kap. 3.3 a tab. 5.

#### 3.6.1. Drsnost povrchu – ideální podmínky

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$V_{\text{cn}_40}$	0,09	3,52	$\pm 0,08$	19,05	$\pm 1,23$	15,89	$\pm 0,46$
$V_{\text{cn}_130}$	0,29	3,98	$\pm 0,08$	18,77	$\pm 0,99$	16,64	$\pm 0,60$
$V_{\text{cn}_220}$	0,49	4,29	$\pm 0,13$	20,20	$\pm 0,69$	17,54	$\pm 0,49$

Tab. 17 – Parametry drsnosti při ideálních řezných podmínkách



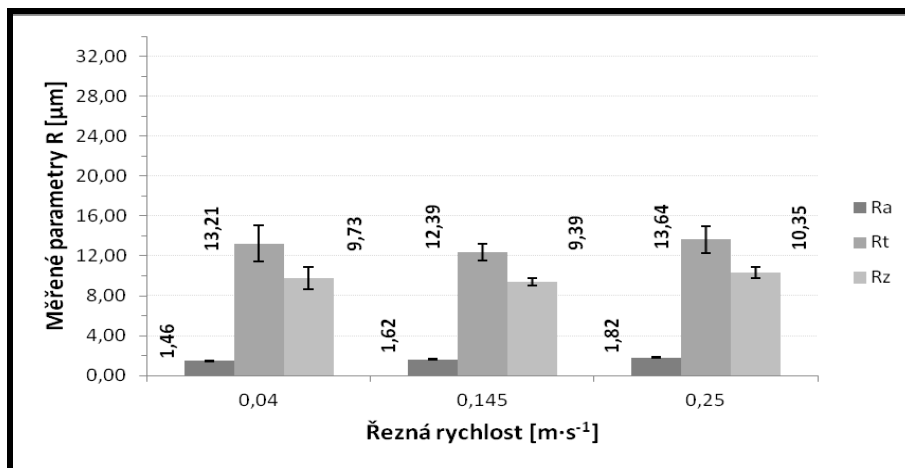
Graf 14 – Parametry drsnosti při ideálních řezných podmínkách

Z výše uvedené tabulky 18 a grafu 14 jsou patrné velikosti naměřených parametrů drsnosti při ideálních podmínkách. Nejmenší hodnoty naměřených parametrů drsnosti jsou  $R_a = 3,52 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 18,77 \mu\text{m}$  a konečně  $R_z = 15,89 \mu\text{m}$ .

### 3.6.2. Drsnost povrchu – $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky: $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_t [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_z [\mu\text{m}]$
$V_{cn1\_40}$	0,04	1,46	$\pm 0,08$	13,21	$\pm 1,81$	9,73	$\pm 1,11$
$V_{cn1\_130}$	0,145	1,62	$\pm 0,05$	12,39	$\pm 0,86$	9,39	$\pm 0,34$
$V_{cn1\_220}$	0,25	1,82	$\pm 0,03$	13,64	$\pm 1,35$	10,35	$\pm 0,57$

Tab. 18 – Parametry drsnosti při otáčkách  $n_1$



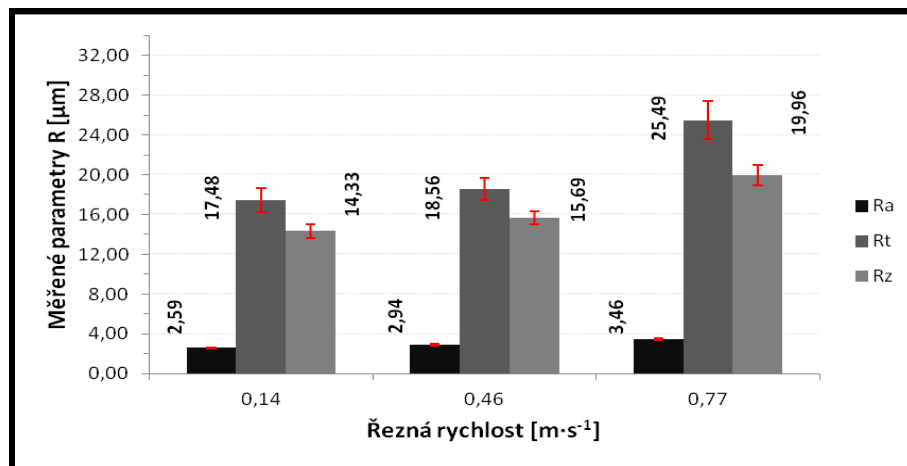
Graf 15 – Parametry drsnosti při otáčkách  $n_1$

Nastavení parametru  $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  zapříčinilo výrazný pokles hodnot měřených parametrů drsnosti oproti ideálním podmínkám. Celkově došlo k poklesu velikosti parametrů  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$  o 40÷50 %. Naměřená minima jsou  $R_a = 1,46 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 12,39 \mu\text{m}$  a  $R_z = 9,39 \mu\text{m}$ .

### 3.6.3. Drsnost povrchu – $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky: $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$V_{\text{cn}2\_40}$	0,14	2,59	$\pm 0,08$	17,48	$\pm 1,21$	14,33	$\pm 0,73$
$V_{\text{cn}2\_130}$	0,46	2,94	$\pm 0,09$	18,56	$\pm 1,10$	15,69	$\pm 0,64$
$V_{\text{cn}2\_220}$	0,77	3,46	$\pm 0,10$	25,49	$\pm 1,91$	19,96	$\pm 1,03$

Tab. 19 – Parametry drsnosti při otáčkách  $n_2$



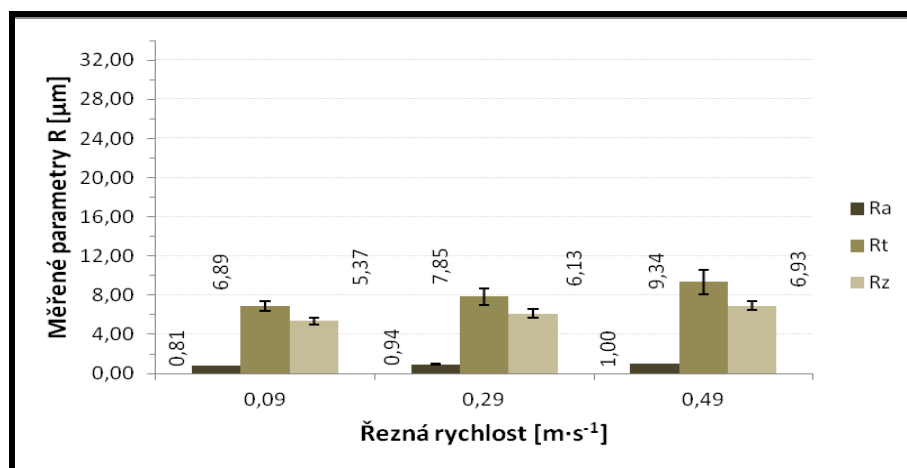
Graf 16 – Parametry drsnosti při otáčkách  $n_2$

Hodnoty  $R_a = 2,59 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 17,48 \mu\text{m}$  a  $R_z = 14,33 \mu\text{m}$ , uvedené v tabulce a grafu výše, vykazují pokles velikosti měřených hodnot parametrů vzhledem ke kapitole 3.6.1. Vůči ideálním řezným podmínkám, viz tab. 5, je u parametrů  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$  patrný pokles minimálních hodnot do  $2 \mu\text{m}$ .

### 3.6.4. Drsnost povrchu – $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_t [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_z [\mu\text{m}]$
$V_{\text{cn}_40}$	0,09	0,81	$\pm 0,04$	6,89	$\pm 0,49$	5,37	$\pm 0,37$
$V_{\text{cn}_130}$	0,29	0,94	$\pm 0,07$	7,85	$\pm 0,82$	6,13	$\pm 0,43$
$V_{\text{cn}_220}$	0,49	1,00	$\pm 0,04$	9,34	$\pm 1,22$	6,93	$\pm 0,46$

Tab. 20 – Parametry drsnosti při posuvu  $f_1$



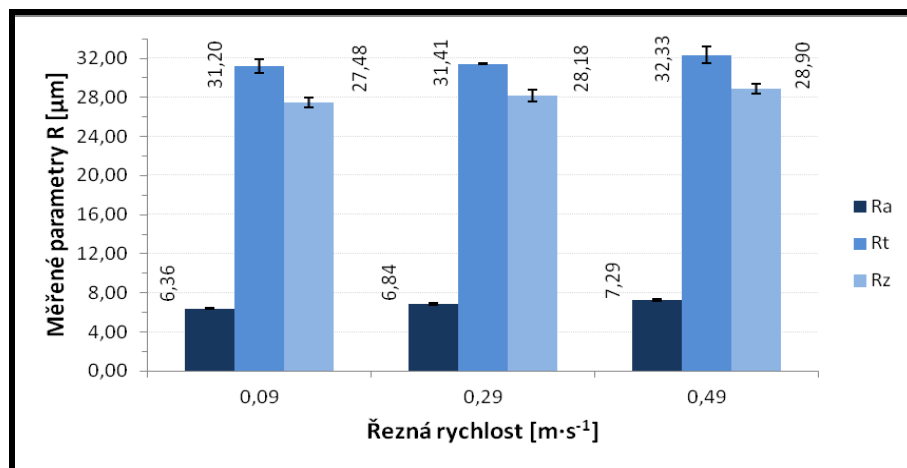
Graf 17 – Parametry drsnosti při posuvu  $f_1$

Obdobně výrazný pokles měřených hodnot jako v kapitole 3.5.4 vykazují řezné podmínky č. 4, uvedené v tab. 5, také u parametrů drsnosti. Při posuvu  $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$  bylo dosaženo minimálních hodnot drsností  $R_a = 0,81 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 6,89 \mu\text{m}$  a konečně  $R_z = 5,37 \mu\text{m}$ .

### 3.6.5. Drsnost povrchu – $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_t [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_z [\mu\text{m}]$
$V_{\text{cn}_40}$	0,09	6,36	$\pm 0,05$	31,20	$\pm 0,74$	27,48	$\pm 0,48$
$V_{\text{cn}_130}$	0,29	6,84	$\pm 0,10$	31,41	$\pm 0,05$	28,18	$\pm 0,64$
$V_{\text{cn}_220}$	0,49	7,29	$\pm 0,09$	32,33	$\pm 0,83$	28,90	$\pm 0,53$

Tab. 21 – Parametry drsnosti při posuvu  $f_2$



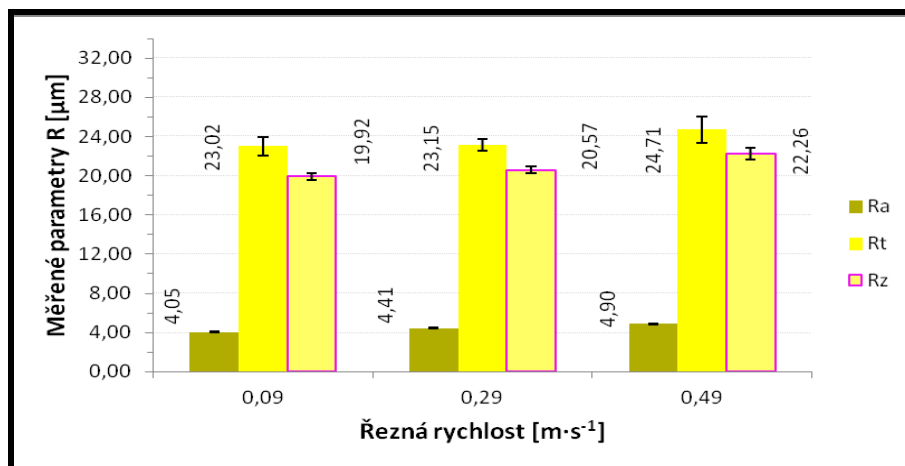
Graf 18 – Parametry drsnosti při posuvu  $f_2$

Nastavení posuvu na hodnotu  $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$  mělo podobný vliv na měřené parametry jako v kapitole 3.5.5. Došlo k nárůstu všech zkoumaných parametrů. Porovnáním výsledků uvedených v kapitole 3.6.1 s výsledky uvedenými v této kapitole je patrný nárůst hodnot v rozsahu 40÷50 %.

### 3.6.6. Drsnost povrchu – $a_{p1} = 1\text{ mm}$

Řezné podmínky: $n = 710\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ , $f = 0,15\text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ , $a_{p1} = 1\text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$V_{cn\_40}$	0,09	4,05	$\pm 0,03$	23,02	$\pm 0,98$	19,92	$\pm 0,35$
$V_{cn\_130}$	0,29	4,41	$\pm 0,05$	23,15	$\pm 0,62$	20,57	$\pm 0,36$
$V_{cn\_220}$	0,49	4,90	$\pm 0,04$	24,71	$\pm 1,34$	22,26	$\pm 0,57$

Tab. 22 – Parametry drsnosti při hloubce záběru  $a_{p1}$



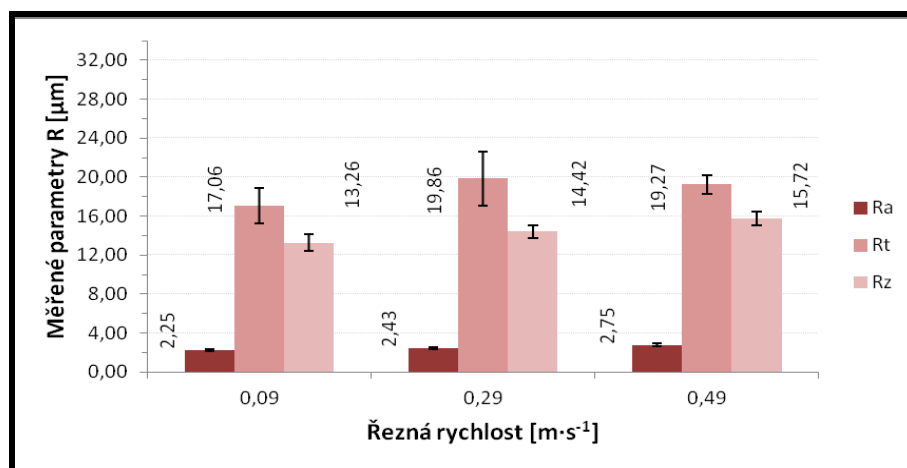
Graf 19 – Parametry drsnosti při hloubce záběru  $a_{p1}$

Naměřená minima hodnot zkoumaných drsností uvedených v tabulce 22, tj.  $R_a = 4,05\text{ }\mu\text{m}$ ,  $R_t = 23,03\text{ }\mu\text{m}$  a  $R_z = 19,92\text{ }\mu\text{m}$ , vykazují nepatrný nárůst. U prvního uvedeného parametru byl naměřen nárůst řádově o  $1\text{ }\mu\text{m}$  a u parametrů  $R_t$  a  $R_z$  řádově o  $5\text{ }\mu\text{m}$ .

### 3.6.7. Drsnost povrchu – $a_{p2} = 4\text{mm}$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_{p2} = 4\text{mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$V_{cn\_40}$	0,09	2,25	$\pm 0,06$	17,06	$\pm 1,82$	13,26	$\pm 0,86$
$V_{cn\_130}$	0,29	2,43	$\pm 0,11$	19,86	$\pm 2,77$	14,42	$\pm 0,67$
$V_{cn\_220}$	0,49	2,75	$\pm 0,15$	19,27	$\pm 0,94$	15,72	$\pm 0,70$

Tab. 23 – Parametry drsnosti při hloubce záběru  $a_{p2}$



Graf 20 – Parametry drsnosti při hloubce záběru  $a_{p2}$

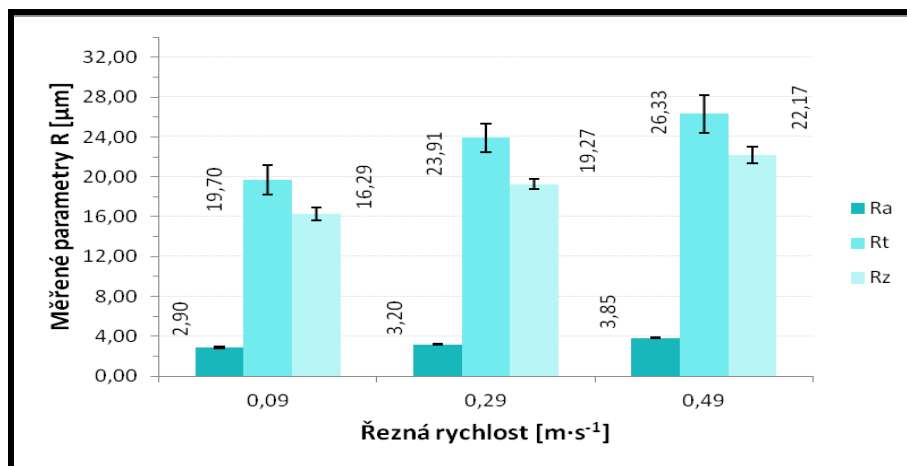
Při obrábění podmínkami č. 8, uvedených v kapitole 3.3, vykazují zkoumané parametry pokles hodnot o  $1 \div 2 \mu\text{m}$  vůči kapitole 3.6.1. Výsledná minima hodnot jsou  $R_a = 2,25 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 17,06 \mu\text{m}$  a  $R_z = 13,26 \mu\text{m}$ .



### 3.6.8. Drsnost povrchu – $\gamma_{o1} = -10^\circ$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_{o1} = -10^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$V_{\text{cn}_40}$	0,09	2,90	$\pm 0,07$	19,70	$\pm 1,51$	16,29	$\pm 0,64$
$V_{\text{cn}_130}$	0,29	3,20	$\pm 0,07$	23,91	$\pm 1,41$	19,27	$\pm 0,52$
$V_{\text{cn}_220}$	0,49	3,85	$\pm 0,06$	26,33	$\pm 1,89$	22,17	$\pm 0,85$

Tab. 24 – Parametry drsnosti při geometrii  $\gamma_{o1} = -10^\circ$



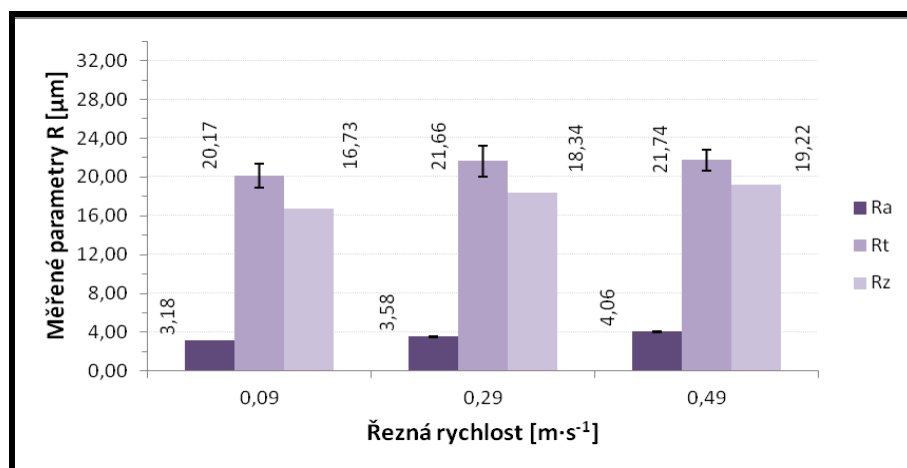
Graf 21 – Parametry drsnosti při geometrii  $\gamma_{o1} = -10^\circ$

Po použití nástroje s geometrií  $\gamma_{o1} = -10^\circ$  bylo naměřeno příznivější minimum parametru drsnosti  $R_a = 2,90 \mu\text{m}$  oproti kapitole 3.6.1. Zbýlé dva parametry vykazují oproti zmíněné kapitole nárůst hodnot. Nejmenší hodnoty drsností  $R_t$  a  $R_z$  jsou  $19,70 \mu\text{m}$  a  $16,29 \mu\text{m}$ .

### 3.6.9. Drsnost povrchu – $\gamma_{o2} = 0^\circ$

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_{o2} = 0^\circ$ , bez PM							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Konfidenční interval $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
$V_{\text{cn}_40}$	0,09	3,18	$\pm 0,05$	20,17	$\pm 1,23$	16,73	$\pm 0,46$
$V_{\text{cn}_130}$	0,29	3,58	$\pm 0,05$	21,66	$\pm 1,59$	18,34	$\pm 0,76$
$V_{\text{cn}_220}$	0,49	4,06	$\pm 0,05$	21,74	$\pm 1,11$	19,22	$\pm 0,44$

Tab. 25 – Parametry drsnosti při geometrii  $\gamma_{o2} = 0^\circ$



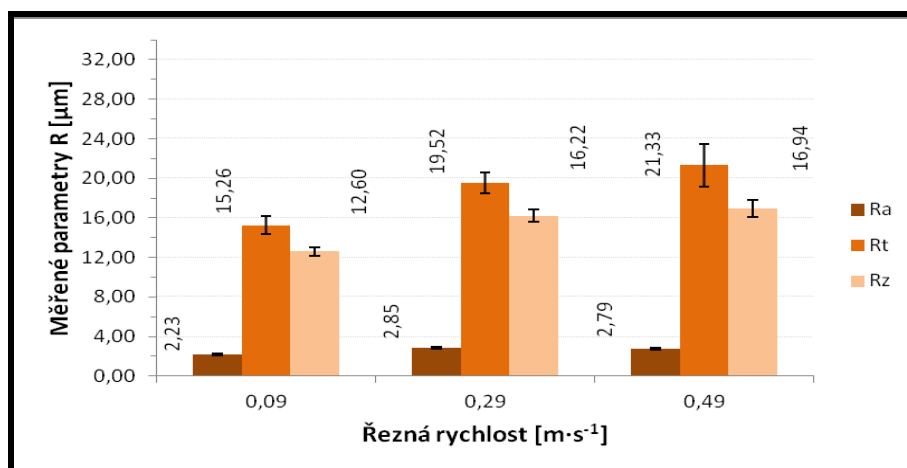
Graf 22 – Parametry drsnosti při geometrii  $\gamma_{o2} = 0^\circ$

Obdobný vliv na zkoumané parametry jako u kapitoly 3.5.8 měla změna geometrie řezného nástroje  $\gamma_{o2} = 0^\circ$  i v této kapitole. I zde bylo docíleno řádově stejných hodnot měřených parametrů jako při obrábění za ideálních podmínek. Za použití  $\gamma_{o2} = 0^\circ$  byly naměřeny nejmenší hodnoty drsností  $R_a = 3,18 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 20,17 \mu\text{m}$  a  $R_z = 16,73 \mu\text{m}$ .

### 3.6.10. Drsnost povrchu – MQL

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_0 = 10^\circ$ , MQL							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_t [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_z [\mu\text{m}]$
$V_{\text{cn}_40}$	0,09	2,23	$\pm 0,09$	15,26	$\pm 0,92$	12,60	$\pm 0,45$
$V_{\text{cn}_130}$	0,29	2,85	$\pm 0,10$	19,52	$\pm 1,07$	16,22	$\pm 0,59$
$V_{\text{cn}_220}$	0,49	2,79	$\pm 0,08$	21,33	$\pm 2,17$	16,94	$\pm 0,86$

Tab. 26 – Parametry drsnosti při použití metody MQL



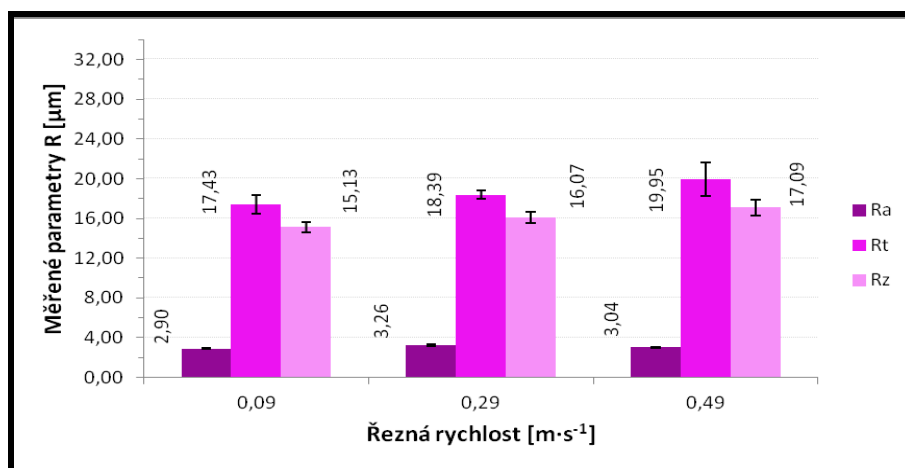
Graf 23 – Parametry drsnosti při použití metody MQL

Aplikace mazání mlhou pozitivně ovlivnila velikosti všech zkoumaných parametrů drsnosti. Při obrábění podmínkami č. 10, viz tab. 5, byla naměřena minima parametrů  $R_a = 2,23 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 15,26 \mu\text{m}$  a konečně  $R_z = 12,60 \mu\text{m}$ .

### 3.6.11. Drsnost povrchu – PK

Řezné podmínky: $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ , $a_p = 2,5 \text{ mm}$ , $\gamma_o = 10^\circ$ , PK							
Řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]		Měřené parametry R					
		$R_a [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_t [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	Konfidenční interval $R_z [\mu\text{m}]$
$V_{\text{cn}_40}$	0,09	2,90	$\pm 0,07$	17,43	$\pm 0,94$	15,13	$\pm 0,51$
$V_{\text{cn}_130}$	0,29	3,26	$\pm 0,06$	18,39	$\pm 0,42$	16,07	$\pm 0,55$
$V_{\text{cn}_220}$	0,49	3,04	$\pm 0,06$	19,95	$\pm 1,65$	17,09	$\pm 0,80$

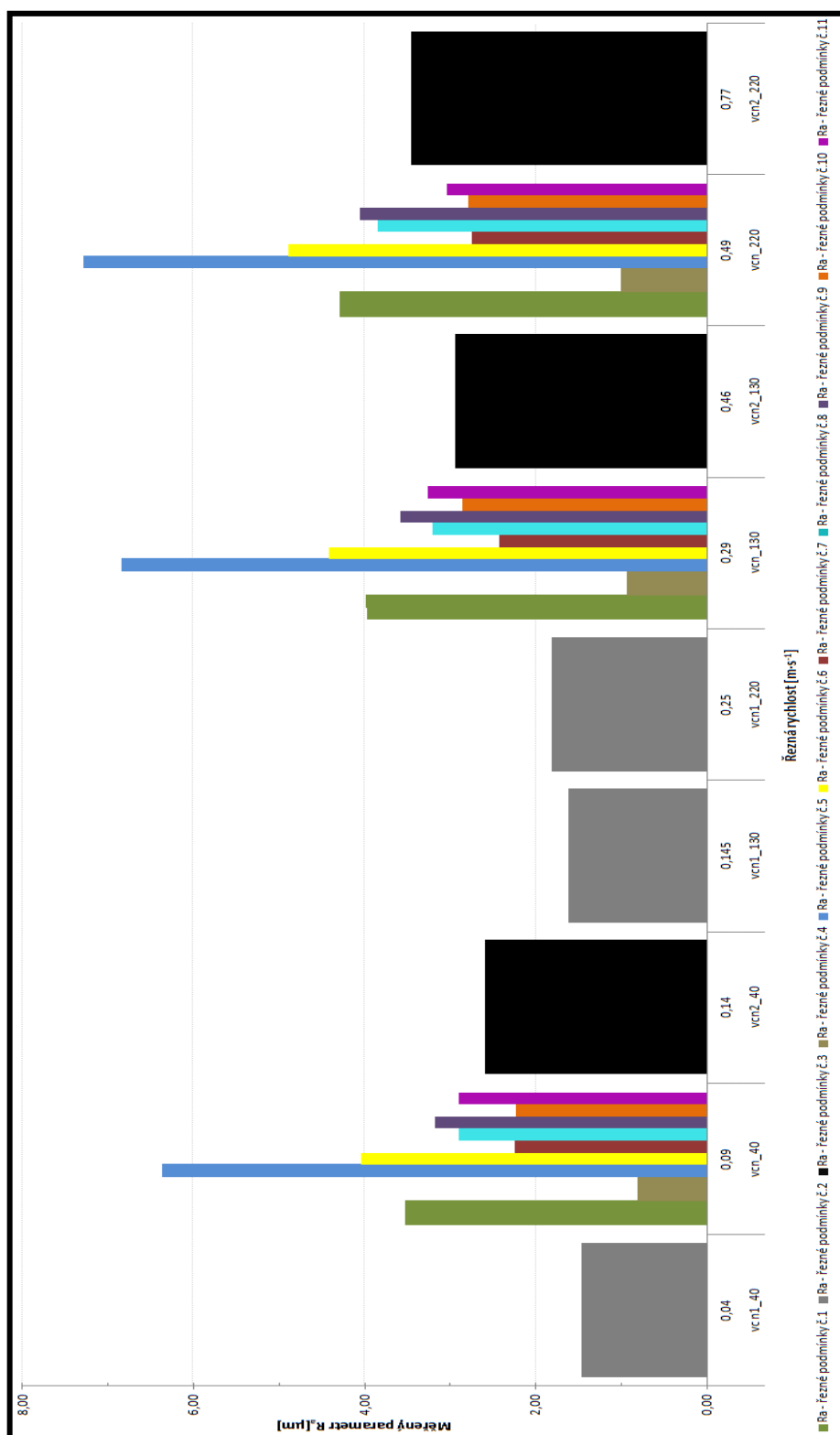
Tab. 27 – Parametry drsnosti při použití PK



Graf 24 – Parametry drsnosti při použití PK

V této kapitole bylo dosaženo obdobných výsledků jako v kapitolách 3.6.1 a 3.6.10. Použití PK nemělo výrazný vliv na zkoumané parametry drsnosti, viz tab. 27. Naměřená minima hodnot  $R_a = 2,90 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 17,43 \mu\text{m}$  a  $R_z = 15,13 \mu\text{m}$ .

### 3.6.12. Souhrn výsledků měření drsnosti



Graf 25 – Souhrnný graf naměřených hodnot parametru  $R_a$

Do souhrnného grafu 25 byly vybrány hodnoty zkoumaného parametru  $R_a$  z důvodu přehlednosti. Ze znázorněných naměřených hodnot jsou patrná minima a maxima měřeného parametru  $R_a$ .

Minimální hodnota  $R_a = 0,81 \pm 0,04 \text{ } \mu\text{m}$  byla naměřena při  $v_{cn\_40} = 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a nastavených podmínkách č. 4, viz tab. 5.

Nejvyšší hodnoty  $R_a = 7,29 \pm 0,09 \text{ } \mu\text{m}$  bylo dosaženo při řezných podmínkách č. 5, viz tab. 5. Této drsnosti bylo dosaženo při řezné rychlosti  $v_{cn\_220} = 0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Řeznou rychlostí  $v_{cn\_40} = 0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a řeznými podmínkami č. 4, viz kap. 3.3, byla zajištěna nejnižší hodnota parametru  $R_t = 6,89 \pm 0,49 \text{ } \mu\text{m}$ .

Řezné podmínky č. 5, uvedeno v kapitole 3.3, a řezná rychlost  $v_{cn\_220} = 0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  zapříčinily vznik největší naměřené hodnoty drsnosti  $R_t$ . Největší naměřenou hodnotou je  $R_t = 32,33 \pm 0,83 \text{ } \mu\text{m}$ .

Nastavením řezných podmínek č. 4, viz tab. 5, byla získána minimální hodnota  $R_z = 5,37 \pm 0,37 \text{ } \mu\text{m}$ .

Bez použití PM a nastavením parametrů  $n = 710 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f_2 = 0,305 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$  byla dosažena maximální hodnota drsnosti  $R_z$ . Maximální hodnota  $R_z = 28,90 \pm 53 \text{ } \mu\text{m}$  se vyskytla při řezné rychlosti  $v_{cn\_220} = 0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## 4. DISKUZE

Hlavním cílem předkládané práce bylo zjištění vlivu geometrie řezného nástroje ze SK, sil při obrábění a drsnosti povrchu na čelní soustružení hliníkových slitin.

Pro dosažení cíle bakalářské práce bylo nutné stanovit vhodné řezné podmínky a následně metodiku pro měření výstupních hodnot na daných použitých přístrojích.

Základní informace týkající se dané problematiky obrábění hliníkových slitin jsou uvedeny v kapitole 2. a podkapitole 2.3. Podkapitola 2.2 obsahuje informace o dosavadních poznatcích týkající se slinutých karbidů a jejich aplikace při obrábění. Nedílnou součástí kapitoly 2. jsou informace o samotné technologii soustružení.

Dosažení požadovaného cíle práce je věnována celá kapitola 3. Kapitola obsahuje veškeré informace o jednotlivých etapách přípravy, popisu podmínek a použitých zařízení pro měření.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze poukázat na následující:

- Řezné síly

V rámci experimentu měření řezných sil působících mezi nástrojem a obrobkem za daných řezných podmínek, viz tab. 5, byla výstupem data z programu LabView. Tato data byla vyhodnocena v prostředí Excel a zanesena do přehledných grafů. Měřenými parametry byly síly  $F_c$  a  $F_p$ . V rámci řešení práce byl vybrán parametr  $F_c$ , jelikož je nejvíce vypovídající při procesu soustružení.

Při ideálních řezných podmínkách, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší řezná síla  $F_c = 302,70 \pm 13,38 \text{ N}$  a největší řezná síla  $F_c = 340,60 \pm 6,50 \text{ N}$ .

Nastavením řezných podmínek č. 2, tj.  $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, bylo dosaženo minimální řezné síly  $F_c = 293,90 \pm 28,49 \text{ N}$  a maximální řezné síly  $F_c = 330,60 \pm 13,87 \text{ N}$ .

Řeznými podmínkami č. 3, tj.  $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, bylo dosaženo nejmenší řezné síly  $F_c = 317,70 \pm 15,87 \text{ N}$  a největší řezné síly  $F_c = 335,40 \pm 26,73 \text{ N}$ .

Při obrábění řeznými podmínkami č. 4, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší řezná síla  $F_c = 157,40 \pm 13,02 \text{ N}$  a největší řezná síla  $F_c = 167,50 \pm 26,78 \text{ N}$ .

U řezných podmínek č. 5, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší řezná síla  $F_c = 504,60 \pm 45,46 \text{ N}$  a největší řezná síla  $F_c = 512,00 \pm 22,66 \text{ N}$ .

Řezné podmínky č. 6, tj.  **$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_{p1} = 1 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM**, vykazují minimální hodnotu řezné síly  **$F_c = 122,60 \pm 8,87 \text{ N}$**  a maximální hodnotu řezné síly  $F_c = 137,80 \pm 4,75 \text{ N}$ . **Tyto řezné podmínky vykazují nejmenší řeznou sílu  $F_c$  ze všech provedených experimentů.**

Použitím řezných podmínek č. 7, tj.  **$n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_{p2} = 4 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM**, bylo dosaženo minimální hodnoty řezné síly  $F_c = 467,40 \pm 23,98 \text{ N}$  a maximální hodnoty řezné síly  **$F_c = 533,90 \pm 24,71 \text{ N}$** . **Tyto řezné podmínky vykazují největší řeznou sílu  $F_c$  ze všech provedených experimentů.**

Obráběním za řezných podmínek č. 8, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_{o1} = -10^\circ$ , bez použití PM, bylo dosaženo nejmenší řezné síly  $F_c = 338,80 \pm 33,13 \text{ N}$  a největší řezné síly  $F_c = 372,00 \pm 31,40 \text{ N}$ .

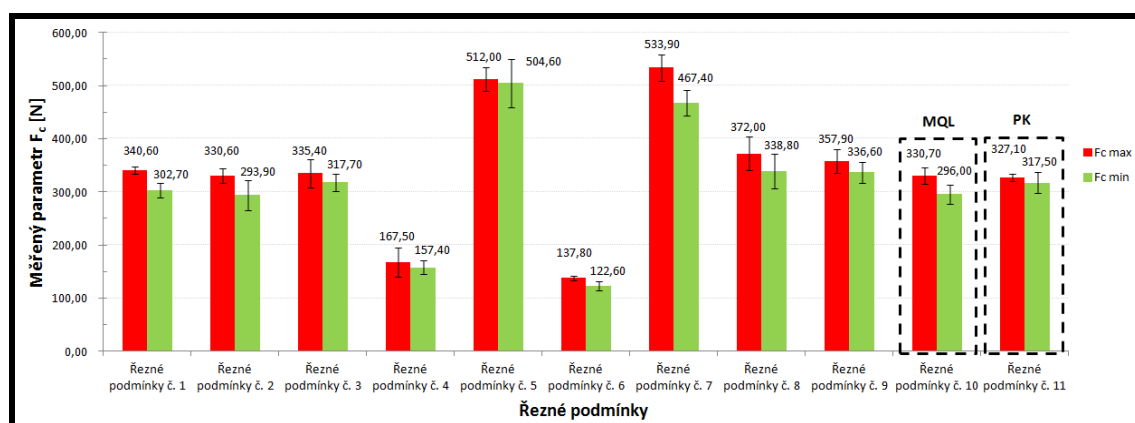
U experimentu s řeznými podmínkami č. 9, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_{o2} = 0^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší řezná síla  $F_c = 336,60 \pm 19,48 \text{ N}$  a největší řezná síla  $F_c = 357,90 \pm 22,26 \text{ N}$ .



Při řezných podmínkách č. 10, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , použití MQL, byla naměřena nejmenší řezná síla  $F_c = 296,00 \pm 18,07 \text{ N}$  a největší řezná síla  $F_c = 330,70 \pm 14,89 \text{ N}$ .

Řeznými podmínkami č. 11, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , použití PK, bylo dosaženo nejmenší řezné síly  $F_c = 317,50 \pm 19,07 \text{ N}$  a největší řezné síly  $F_c = 327,10 \pm 7,48 \text{ N}$ .

Minimální a maximální naměřené hodnoty řezné síly  $F_c$  byly zaneseny do přehledného grafu 26, viz graf níže.



Graf 26 – Minimální a maximální hodnoty řezné síly  $F_c$

- Drsnosti povrchů

Drsnost obrobených polotovaru byla v rámci experimentu měřena profilometrem Mitutoyo Surftest SV-2000N2, viz kapitola 3.2.6., který využívá dotykovou metodu pro měření drsnosti. Naměřená data byla vyhodnocena v prostředí Excel a zanesena do přehledných grafů.

Měřenými parametry byly drsnosti  $R_a$ ,  $R_t$  a  $R_z$ . Z měřených parametrů drsnosti byl vybrán parametr  $R_a$ , jelikož se jedná o nejčastěji užívaný parametr drsnosti v České republice.

Nastavením ideálních řezných podmínek, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, bylo dosaženo nejmenší drsnosti  $R_a = 3,52 \pm 0,08 \mu\text{m}$  a největší drsnosti  $R_a = 4,29 \pm 0,13 \mu\text{m}$ .

Při řezných podmínkách č. 2, tj.  $n_1 = 355 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší drsnost  $R_a = 1,46 \pm 0,08 \mu\text{m}$  a největší drsnost  $R_a = 1,82 \pm 0,03 \mu\text{m}$ .

Řeznými podmínkami č. 3, tj.  $n_2 = 1120 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, byla dosažena nejmenší hodnota drsnosti  $R_a = 2,59 \pm 0,08 \text{ } \mu\text{m}$  a největší hodnota drsnosti  $R_a = 3,46 \pm 0,10 \text{ } \mu\text{m}$ .

Při obrábění řeznými podmínkami č. 4, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší drsnost  **$R_a = 0,81 \pm 0,04 \text{ } \mu\text{m}$**  a největší drsnost  $R_a = 1,00 \pm 0,04 \text{ } \mu\text{m}$ . **Tyto řezné podmínky vykazují nejmenší hodnotu drsnosti  $R_a$  ze všech provedených experimentů.**

U řezných podmínek č. 5, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší drsnost  $R_a = 6,36 \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$  a největší drsnost  **$R_a = 7,29 \pm 0,09 \text{ } \mu\text{m}$** . **Tyto řezné podmínky vykazují největší hodnotu drsnosti  $R_a$  ze všech provedených experimentů.**

Řezné podmínky č. 6, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_{p1} = 1 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, vykazují minimální hodnotu drsnosti  $R_a = 4,05 \pm 0,03 \text{ } \mu\text{m}$  a maximální hodnotu drsnosti  $R_a = 4,90 \pm 0,04 \text{ } \mu\text{m}$ .

Použitím řezných podmínek č. 7, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_{p2} = 4 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM, bylo dosaženo minimální hodnoty drsnosti  $R_a = 2,25 \pm 0,06 \text{ } \mu\text{m}$  a maximální hodnoty drsnosti  $R_a = 2,75 \pm 0,15 \text{ } \mu\text{m}$ .

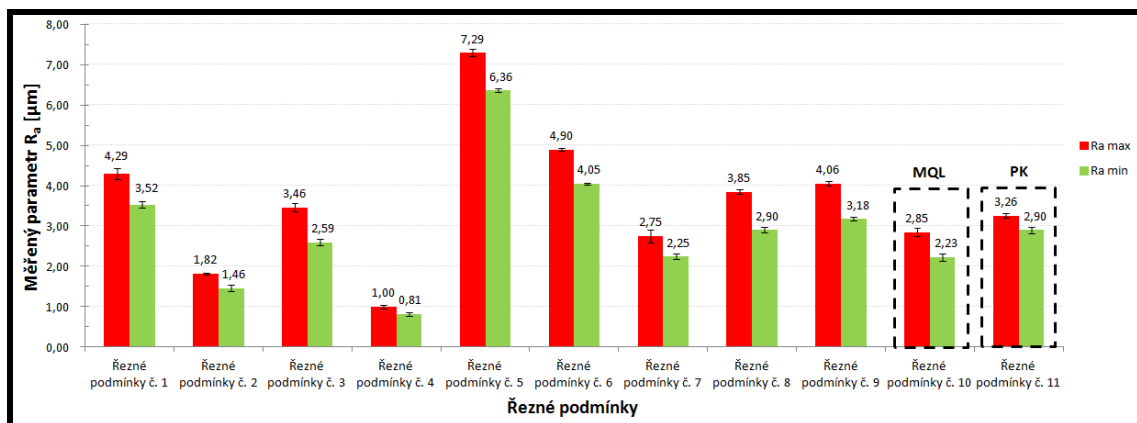
Obráběním za řezných podmínek č. 8, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_{o1} = -10^\circ$ , bez použití PM, bylo dosaženo nejmenší drsnosti  $R_a = 2,90 \pm 0,07 \text{ } \mu\text{m}$  a největší drsnosti  $R_a = 3,85 \pm 0,06 \text{ } \mu\text{m}$ .

U experimentu s řeznými podmínkami č. 9, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_{o2} = 0^\circ$ , bez použití PM, byla naměřena nejmenší drsnost  $R_a = 3,18 \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$  a největší drsnost  $R_a = 4,06 \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$ .

Při řezných podmínkách č. 10, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , použití MQL, byla naměřena nejmenší drsnost  $R_a = 2,23 \pm 0,09 \text{ } \mu\text{m}$  a největší drsnost  $R_a = 2,85 \pm 0,10 \text{ } \mu\text{m}$ .

Řeznými podmínkami č. 11, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , použití PK, bylo dosaženo nejmenší drsnosti  $R_a = 2,90 \pm 0,07 \text{ } \mu\text{m}$  a drsnosti  $R_a = 3,26 \pm 0,06 \text{ } \mu\text{m}$ .

Minimální a maximální naměřené hodnoty drsnosti  $R_a$  byly zaneseny do přehledného grafu 27, viz graf níže.



Graf 27 – Minimální a maximální hodnoty drsnosti  $R_a$

Použití procesních médií mělo velký vliv na vznik nárůstku. Experimenty s použitím PM vykazovaly minimální vznik nárůstku, viz obr. 36 a 37.

Obrázek 38 zachycuje povrch dosažený při řezných podmínkách č. 4, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM. Při těchto řezných podmínkách bylo dosaženo, po vizuální stránce, nejlepší kvality povrchu. Na obrázku 39 je zobrazena, po vizuální stránce, nejhorší dosažená kvalita povrchu. Tohoto povrchu bylo dosaženo při podmínkách č. 10, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , použití MQL.



Obr. 38 – Povrch při řezných podmínkách č. 4



Obr. 39 – Povrch při řezných podmínkách č. 10

## 5. ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce na téma Vliv geometrie řezného nástroje ze slinutého karbidu na čelní soustružení hliníkových slitin přispívá k rozšíření poznatků o obrábění těchto slitin se specifickými vlastnostmi. Práce byla členěna do dvou hlavních částí.

V teoretické části byla věnována pozornost technologii soustružení, slinutým karbidům, slitinám hliníku a v neposlední řadě problematice jejich obrábění.

Experimentální část se zabývá metodikou experimentu a jeho provedení. V metodice byly popsány stroje, nástroje, měřicí přístroje a měřené parametry. Byly zkoumány řezné síly působící na nástroj, velikosti vznikajících nárůstků a výsledné drsnosti obrobených povrchů.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků uvedených v podkapitolách 3.5 a 3.6 je možno poukázat na následující:

1. Nejlepší řezné síly  $F_c = 122,60 \pm 8,87$  N bylo dosaženo při nastavených řezných podmínkách  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_{p1} = 1 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM (řezné podmínky č. 6).

2. Nejhorší řezné síly  $F_c = 533,90 \pm 24,71$  N bylo dosaženo při nastavených řezných podmínkách  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_{p2} = 4 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM (řezné podmínky č. 7).

3. Nejmenší drsnost  $R_a = 0,81 \pm 0,04 \text{ } \mu\text{m}$  byla naměřena při řezných podmínkách  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM (řezné podmínky č. 4).

4. Největší drsnost  $R_a = 7,29 \pm 0,09 \text{ } \mu\text{m}$  byla naměřena při řezných podmínkách  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_2 = 0,305 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM (řezné podmínky č. 5).

5. Použití procesního média mělo velký vliv na vznik nárůstku. V experimentech bez PM nárůstek vznikl a jeho velikost se lišila dle použitých řezných podmínek. Experimenty s použitím PM vykazovaly minimální vznik nárůstku.

Na základě výše uvedených výsledků doporučuji pro firmu Ronal ČR s.r.o. použít řezné podmínky č. 4, tj.  $n = 710 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f_1 = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ,  $a_p = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\gamma_o = 10^\circ$ , bez použití PM. Tyto řezné podmínky vykazují nejmenší hodnotu drsnosti  $R_a$ , řezné síly  $F_c$  jsou řádově o 30 N vyšší než nejmenší naměřené hodnoty a obrobený povrch je kompaktní po celé ploše.

## 6. ZDROJE

- [1] ALAXIN, Ján. *Fyzikální metalurgie*. sv. 1. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1982.
- [2] DRÁB, Vojtěch. *Technologie*. sv. 1. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1979.
- [3] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [4] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-85825-10-4.
- [5] JERSÁK, Jan. *Soubory ke stažení* [online]. Katedra obrábění a montáže, Technická univerzita v Liberci. [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <http://www.kom.tul.cz/download.php>
- [6] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [7] LEDVINA, Miloslav. *Výzkum vlivů progresivních způsobů chlazení vybraných technologií obrábění*. Liberec, 2017. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
- [8] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2790-6.
- [9] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění a montáží*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990.
- [10] *Proal. Informace*. [online]. ©2009 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424222.htm>
- [11] *Produktový list Pilous spol. s r.o. Pilous ARG 300 – pásová pila na kov*. [online]. [cit. 2018-11-01]. Dostupný z: <https://www.pilous.cz/metal/pasove-pily-na-kov/hydraulicko-gravitacni/arg-300-plus-h-f>
- [12] *Řezné materiály současnosti*. MM Spectrum [online]. 09.05.2018 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>
- [13] *Trendy v povlakování slinutých karbidů*. MM Spectrum [online]. 11. 07. 2001 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>

- [14] *9 essentials think petting CNN lathe tooling*. CNC Cookbook [online]. ©2018 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/9-essentials-think-setting-cnc-lathe-tooling/>
- [15] HORÁK, Jaroslav. *Řezné nástroje pro hospodárné soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní
- [16] NEJMAN, Dominik. *Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní
- [17] NOVÁK, Vojtěch. *Vliv opakovaného tepelného zpracování na obrobiteľnosť materiálu a jakost povrchu obrobků při technologii frézování*. Liberec, 2017. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.

# **PŘÍLOHY**



## Příloha č. 1